PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Le nuove vite del calcestruzzo riciclato



Prof. Flavio Stochino

Università degli Studi di Cagliari · DICAAR

WWW.PROSPECTAFORMAZIONE.IT

Categoria	Dato	Fonte
Impronta di carbonio per tonnellata di cemento	0.83 tons CO2eq	United States Environmental Protection Agency. (2020). Cement and Concrete Products Sector.
Consumo energetico totale durante la produzione	3-5 kWh/m³	Wuppertal Institute. (2013). Life cycle assessment of cement.
Produzione di rifiuti di calcestruzzo	20-40% dei rifiuti totali da costruzione	World Economic Forum. (2019). The future of concrete: A sustainable infrastructure for the 21st century.
Emissioni di gas serra derivanti dalla produzione di cemento	8.7% delle emissioni globali di GHG	Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of climate change.
Consumo d'acqua durante la produzione	1,500-2,000 liters/m³	LafargeHolcim. (2020). Sustainability report.
Mix delle fonti energetiche per la produzione del cemento	70% combustibili fossili, 30% energie rinnovabili	Euromonitor International. (2020). Cement and concrete products: World market situation.

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Consumo di sabbia e ghiaia per settore



Si stima che il consumo globale di aggregati, comprendenti sabbia e ghiaia, raggiunga ogni anno decine di miliardi di tonnellate. Alcune fonti indicano valori dell'ordine di 40–50 miliardi di tonnellate all'anno.

Il settore delle costruzioni rappresenta il principale motore di questa domanda e consuma una quota significativa di tali aggregati.

Andrew, R. M. (2019). Global CO 2 emissions from cement production, 1928–2018. Earth System Science Data, 11(4), 1675-1710.
Stripple, H. (2001). Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis.
Chatziaras, N., Psomopoulos, C. S., & Themelis, N. J. (2014, June). Use of alternative fuels in cement industry. In Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment (Vol. 1, pp. 521-529).





The Deadly Global War for Sand – Vince Besier, Chi Yin Sim

https://pulitzercenter.org/projects/deadly-global-war-sand

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

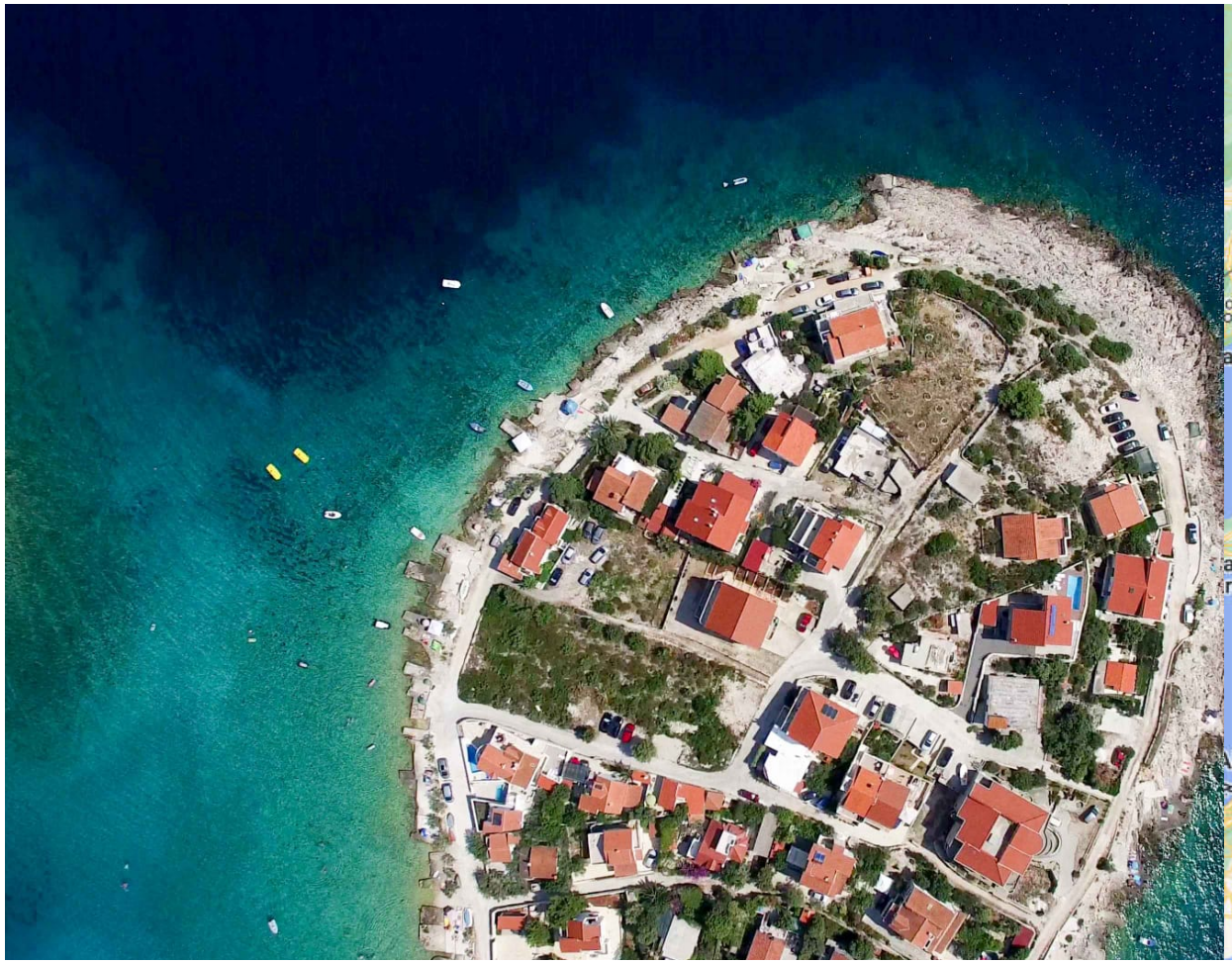
Economia circolare e Sardegna

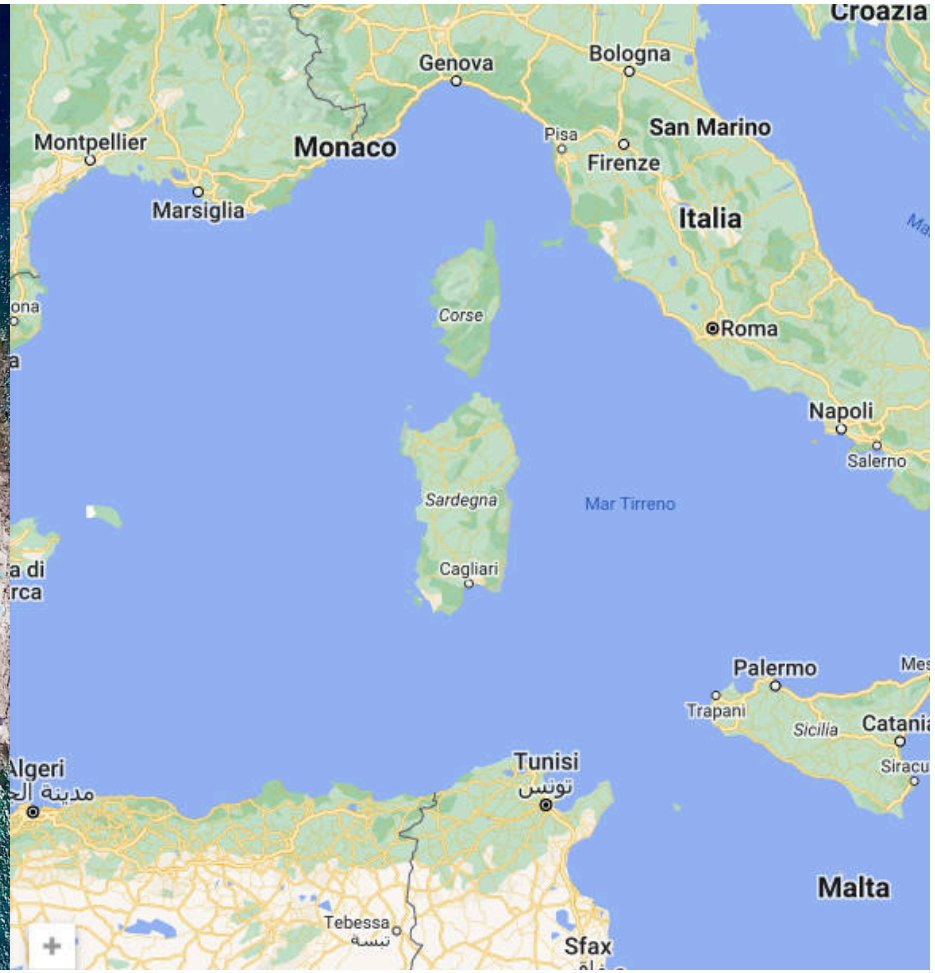


PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

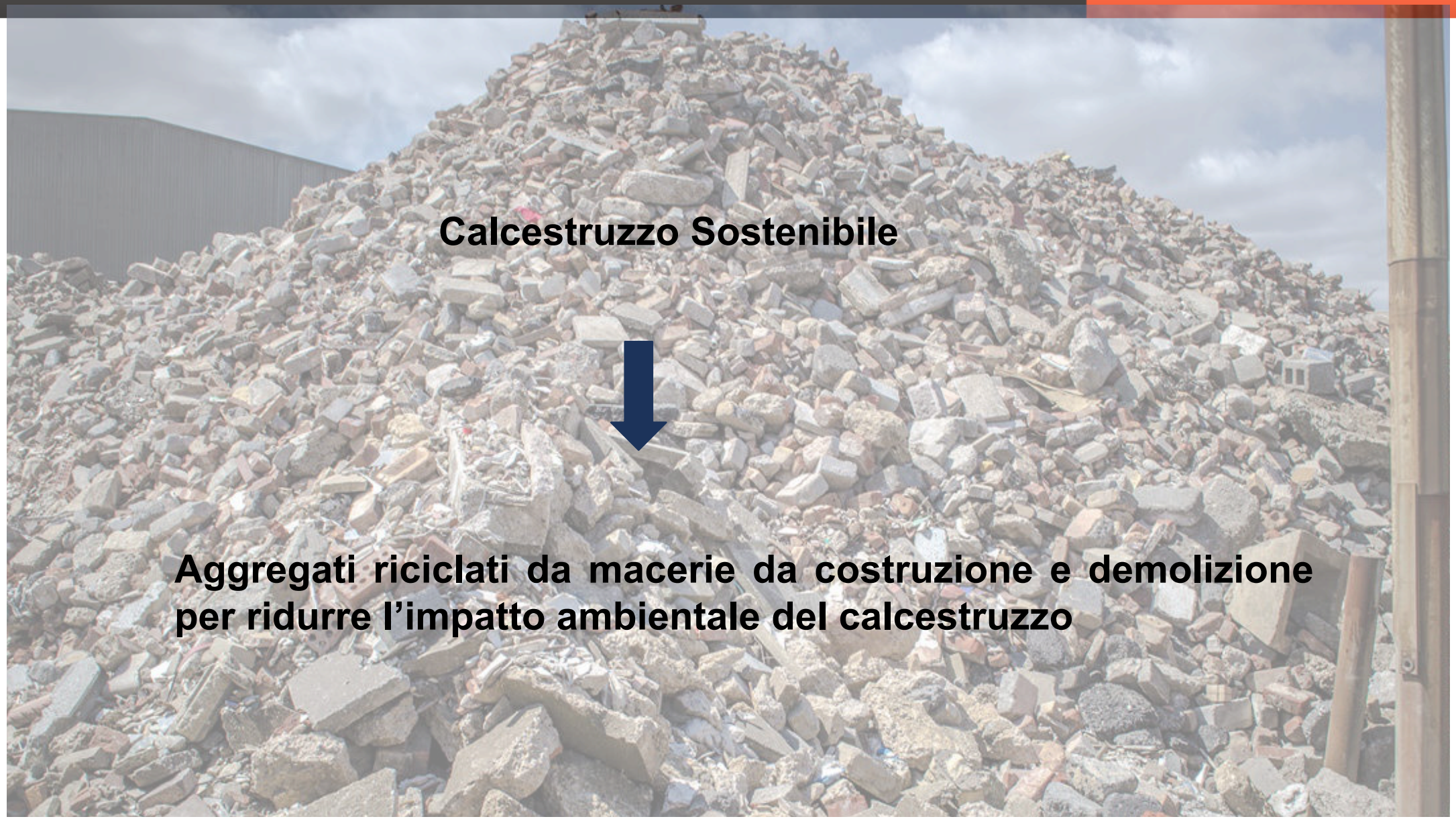
Economia circolare e Sardegna





PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura



Calcestruzzo Sostenibile

Aggregati riciclati da macerie da costruzione e demolizione per ridurre l'impatto ambientale del calcestruzzo

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

1- Prestazioni Meccaniche e durabilità

2- Elementi Strutturali

3- Solette Composte



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Economia circolare e Sardegna

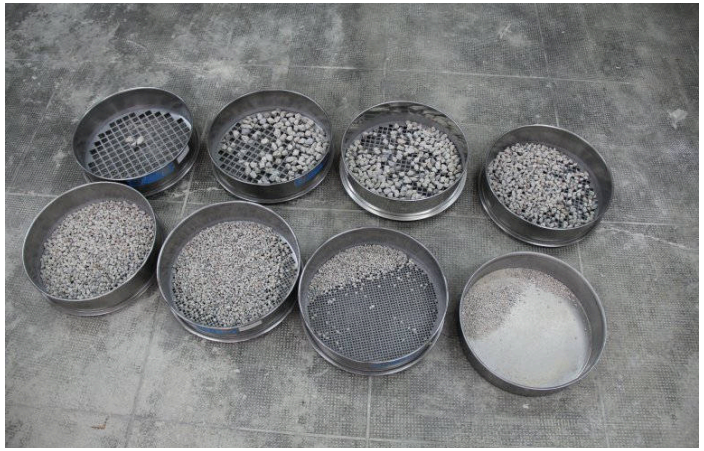
Il riciclo dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW) può rappresentare una strategia molto promettente per ridurre l'impatto ambientale.

È possibile ottenere facilmente calcestruzzo riciclato con resistenza a compressione medio-bassa, indipendentemente dalla qualità specifica del calcestruzzo originario.

Il calcestruzzo originario (genitore) ha un'influenza?

In realtà, il processo di produzione degli aggregati riciclati svolge un ruolo cruciale nel determinare le prestazioni finali, poiché può modificare notevolmente la quantità di malta aderente.







PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Caso studio – Vecchio stadio di calcio di Cagliari

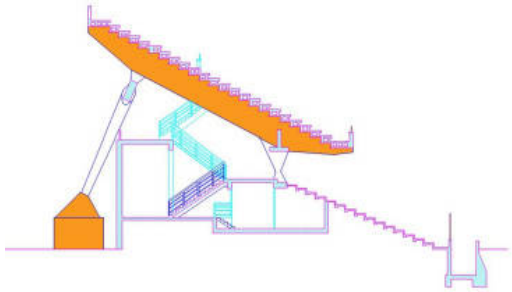


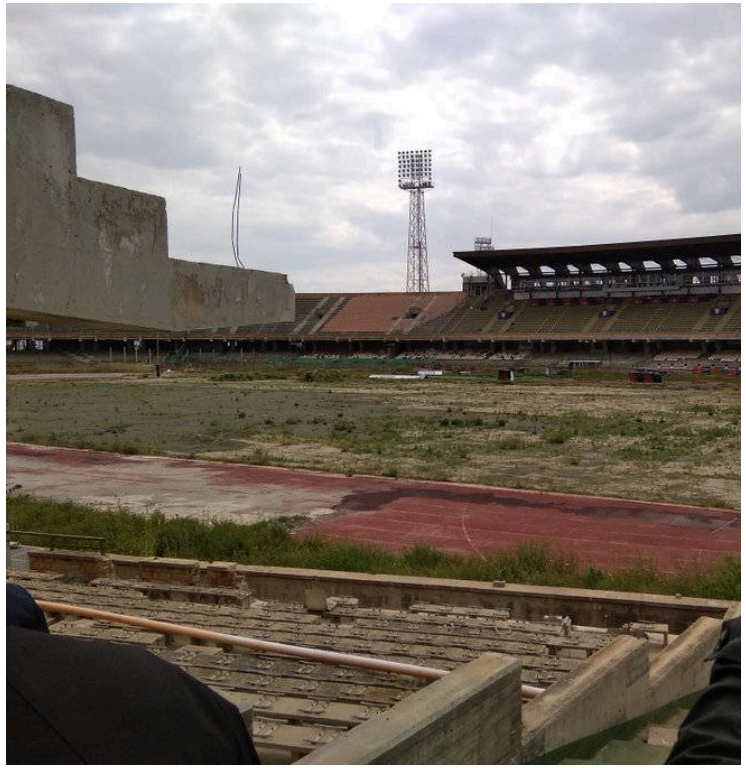


The recycled aggregates come from the concrete structures (slab beams and foundations) of the old
stadium of football located in Cagliari (Sardinia, Italy, built in 1968).

Necessità di una nuova struttura

Tonnellate di rifiuti
di calcestruzzo:
un costo o un'opportunità?





PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

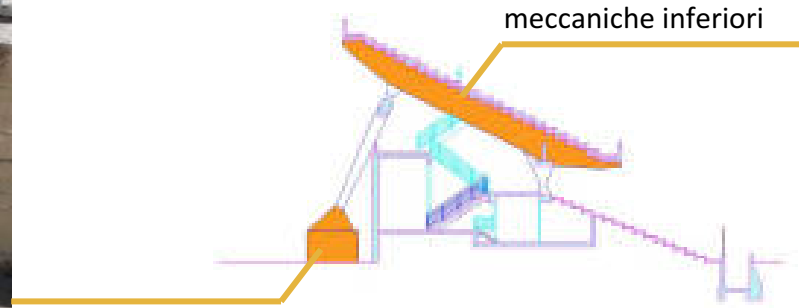
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Caso studio – Vecchio stadio di calcio di Cagliari

C. Found.	1	2	3	4	5	6	Avg. Value
R_c (MPa)	26.8	32.2	24.7	-	-	-	27.9
f_{ct} (MPa)	-	-	-	2.04	1.83	2.28	2.05
E_c (MPa)	24470	27751	23785	-	-	-	25335

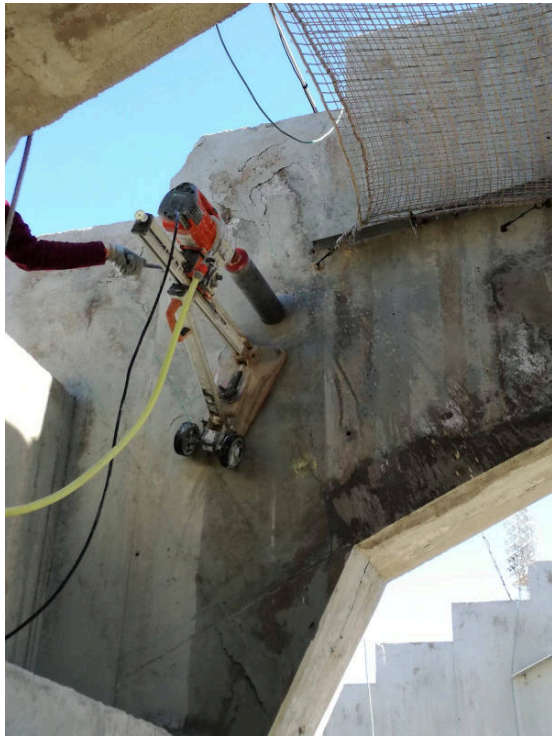
C. Beam	1	2	3	4	5	6	Avg. Value
R_c (MPa)	22.2	22.1	18.7	-	-	-	21.0
f_{ct} (MPa)	-	-	-	1.50	1.58	1.40	1.49
E_c (MPa)	19774	18537	15845	-	-	-	18042





C. beam: proprietà meccaniche inferiori

C. foundation: Higher mechanical properties



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Aggregati riciclati

		RA_Foundation	RA_Beam
Geometriche	Aggregate sizes	4/16	4/16
	Grading	GC 90/15, GT 17.5	GC 90/15, GT 17.5
	Shape Index	59	34
	Flakiness Index	4	4
	Shell content of coarse aggregate	absent	absent
	Fines content	0.15%	0.59%
Fisiche	Resistance to fragmentation of coarse aggregate	39	39
	Saturated surface-dried particle density	2.39	2.38
	Bulk density	1.23	1.14
	Voids%	45	49
	water absorption	7.0	6.7
	Classification of the coarse recycled aggregates constituents:		
	X	0	0
	Rc %	74	78
	Ru %	27	22
	Rb=Ra=Rg %	0	0
Chimiche	Content of water-soluble chloride salts	0.005%	0.005%
	Content of acid-soluble chloride salts	0.325%	0.325%
	Content of acid-soluble sulphate	0.43%	0.26%
	Content of Total Sulfur	< 0.1%	< 0.1%
	Content of water-soluble sulphates	0.148%	0.068%



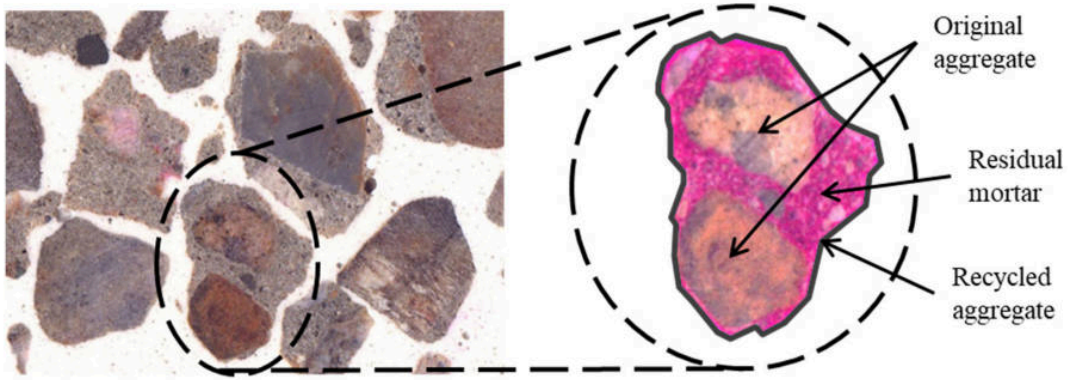
PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

	Sieve Retained 4 mm	Sieve Retained 10 mm
RA_Found.	55.81%	45.82%
RA_Beams	49.67%	45.65%

La determinazione del **contenuto di malta residua (RMC)** è di fondamentale importanza per comprendere e valutare meglio le proprietà del calcestruzzo con aggregati riciclati.

La quantità e le proprietà della pasta cementizia residua presente negli aggregati di calcestruzzo riciclato influenzano significativamente le proprietà meccaniche e di durabilità del nuovo calcestruzzo.



(a) Recycled aggregate concrete with white cement

(b) Recycled aggregate with 1% phenolphthalein solution

Grabiec, A. M., Kim, J., Ubysz, A., & Bilbao, P. (2021). Some Remarks towards a Better Understanding of the Use of Concrete Recycled Aggregate: A Review. *Sustainability*, *13*(23), 13336.

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Caso studio – Vecchio stadio di calcio di Cagliari

	FINE NA (kg/m^3)	COARSE NA (kg/m^3)	COARSE RA_F (kg/m^3)	COARSE RA_B (kg/m^3)	ADDITIVE (kg/m^3)
NC	847.49	880.06	-	-	2.91
RC_B 30%	821.80	616.04	-	263.69	3.31
RC_B 50%	802.97	440.03	-	440.27	3.31
RC_B 80%	778.15	176.01	-	703.96	4.00
RC_F 30%	821.80	616.04	263.69	-	3.31
RC_F 50%	802.97	440.03	440.27	-	4.00
RC_F 80%	778.15	176.01	703.96	-	4.00

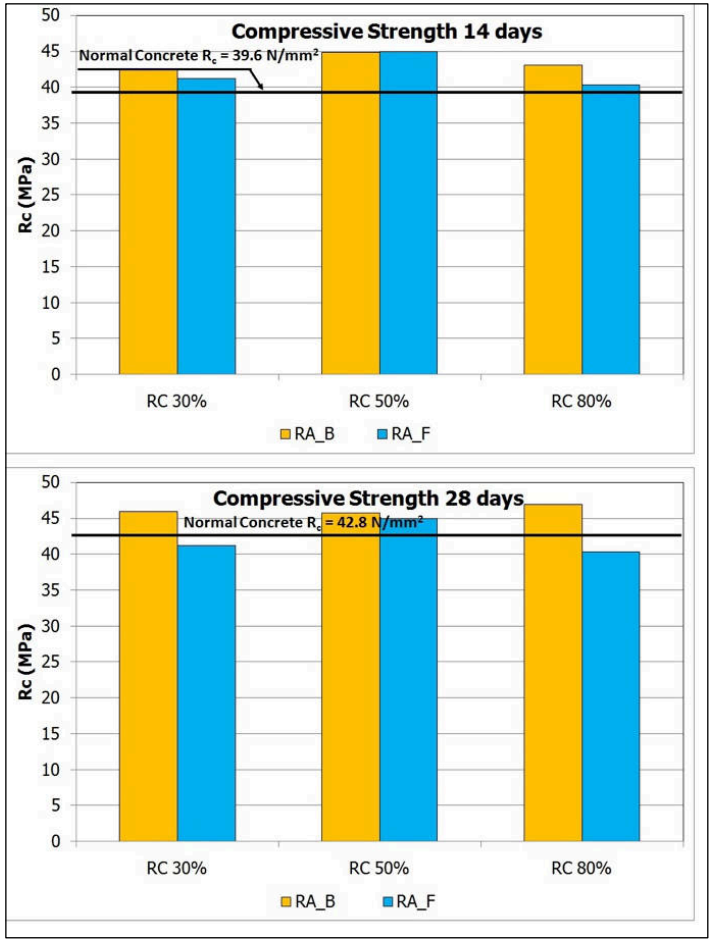
Water to cement ratio= 0.463
Average density 2283 kg/m^3.

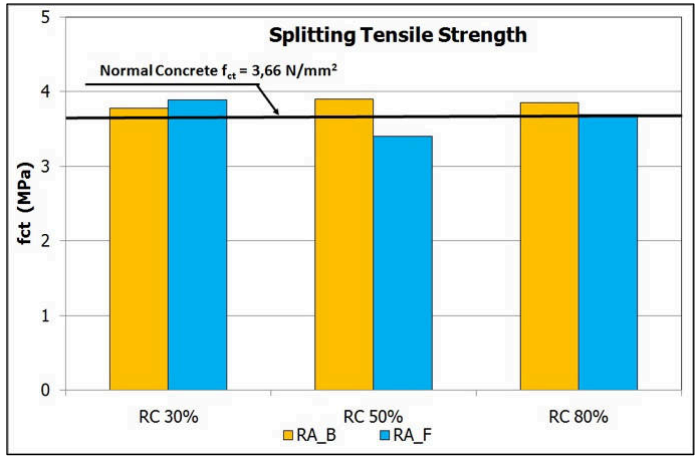


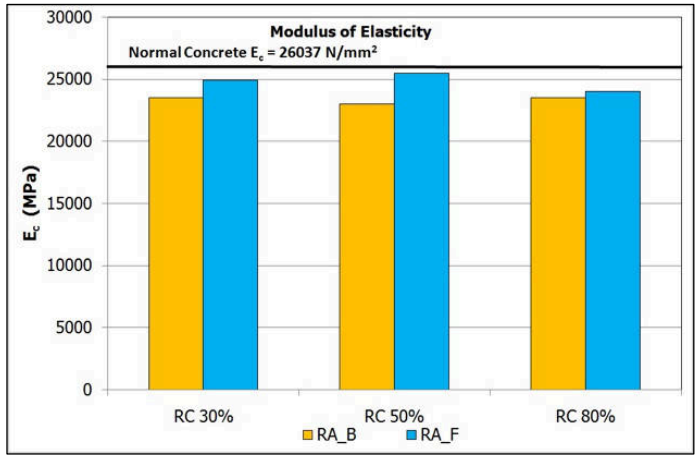


PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Prestazioni Meccaniche

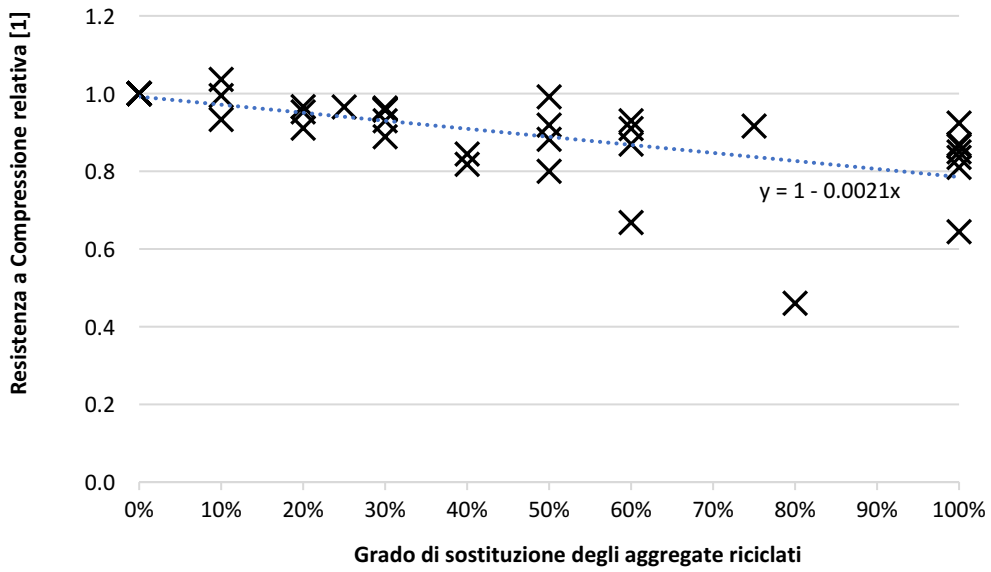








Prestazioni Meccaniche – resistenza a compressione



[79] L. Evangelista, J. de Brito, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites 29 (2007) 397–401. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
[80] C.-C. Fan, R. Huang, H. Hwang, S.-J. Chao, Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes, Construction and Building Materials 112 (2016) 708–715. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154.
[81] L. Evangelista, J. de Brito, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites 32 (2010) 9–14. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.
[82] H. Yaprak, H. Aruntaş, I. Demir, O. Şimşek, G. Durmuş, Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties, International Journal of Physical Sciences 6 (2011) pp.2455-2461.
[83] J. Geng, J. Sun, Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete, Construction and Building Materials 49 (2013) 814–820. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.090.
[84] F. Cartuxo, J. de Brito, L. Evangelista, J.R. Jiménez, E.F. Ledesma, Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer, Construction and Building Materials 89 (2015) 36–47. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.119.
[85] F. Cartuxo, J. De Brito, L. Evangelista, J.R. Jiménez, E.F. Ledesma, Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers, Materials 9 (2016) 98. https://doi.org/10.3390/ma9020098.
[86] R. Kumar, S.C.B. Gurram, A.K. Minocha, Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete, Magazine of Concrete Research 69 (2017) 1288–1295. https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00030.
[87] J.M. Khatib, Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, Cement and Concrete Research 35 (2005) 763–769. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017.
[88] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista, Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties, Construction and Building Materials 154 (2017) 294–309. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215.
[89] Z. Guo, Chen ,Chen, Lehman ,Dawn E., Xiao ,Wenguang, Zheng ,Songlin, B. and Fan, Mechanical and durability behaviours of concrete made with recycled coarse and fine aggregates, European Journal of Environmental and Civil Engineering 24 (2020) 171–189. https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1371083.
[90] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C.C.D. Molin, J.L.D. Ribeiro, Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials 24 (2010) 421–430. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011.

Alibeigibeni, Alireza, Flavio Stochino, Marco Zucca, and Fernando López Gayarre. "Enhancing concrete sustainability: A critical review of the performance of recycled concrete aggregates (RCAs) in structural concrete." Buildings 15, no. 8 (2025): 1361.

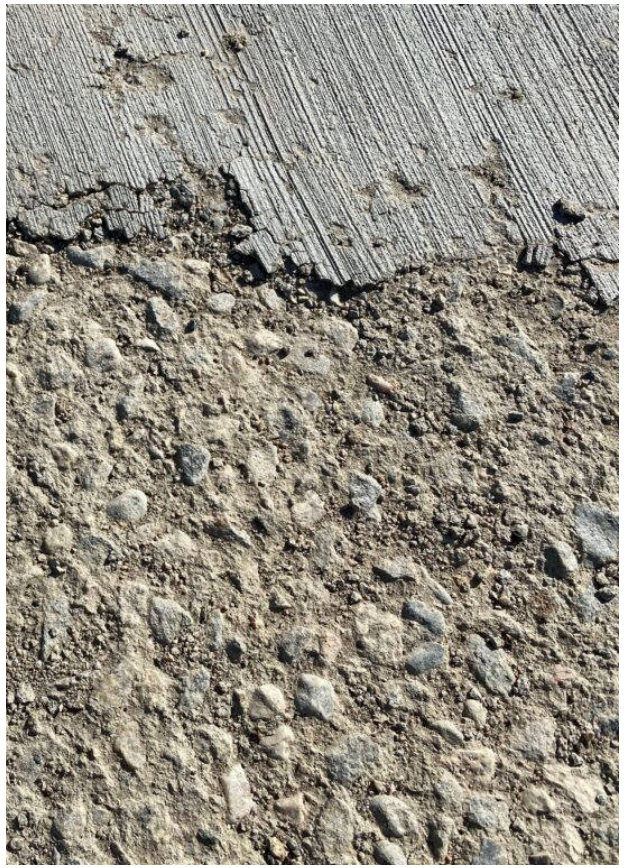
Durabilità:

Resistenza alla pressione dell’acqua









Cicli di gelo-disgelo

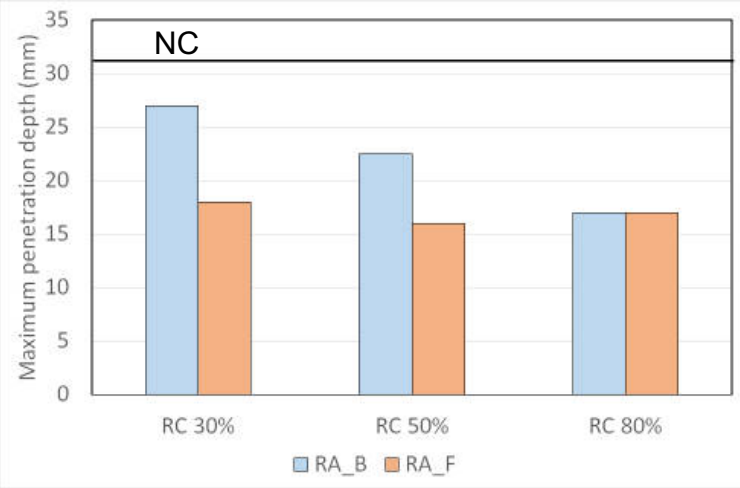


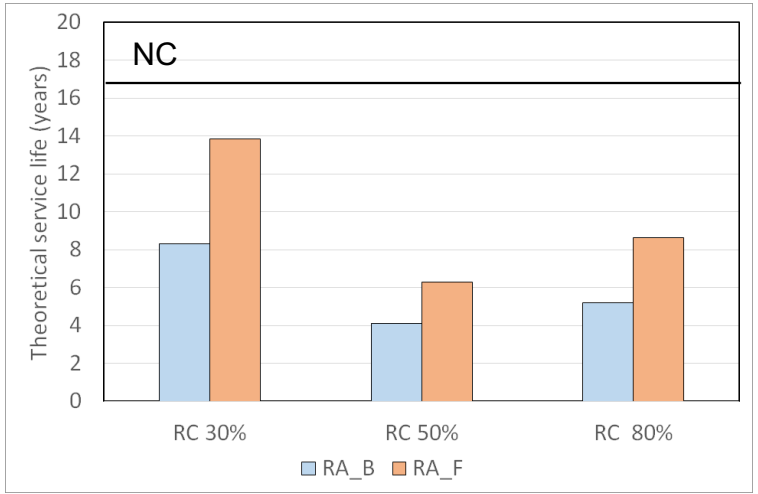
Attacco da cloruri

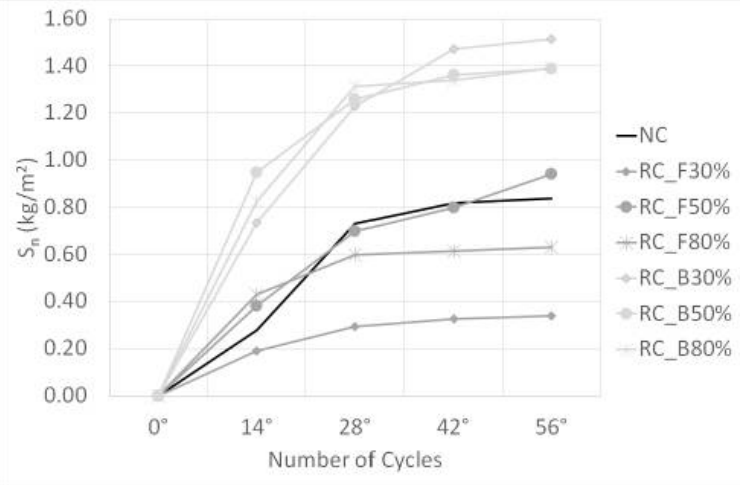


PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l’edilizia e l’architettura









*Pani L., Francesconi L., Rombi J., Mistretta F., Sassu M., Stochino F. "Effect of parent concrete on the performance of recycled aggregate concrete", **Sustainability** 12(22): 1-17 (2020), DOI: 10.3390/su12229399*

Pani, L., Francesconi, L., Rombi, J., Stochino, F., & Mistretta, F. (2020). The Role of Parent Concrete in Recycled Aggregate Concrete. In Computational Science and Its Applications–ICCSA 2020: 20th International Conference, Cagliari, Italy, July 1–4, 2020, Proceedings, Part VII 20 (pp. 368-378). Springer International Publishing.

Stochino, F., Pani, L., Sassu, M., Croce, P., Formichi, P., & Landi, F. (2022). Sustainable Concrete with Recycled Aggregates: experiences and perspective. In 6th Workshop on The New Boundaries of Structural Concrete 2022 (pp. 394-403).

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

1- Prestazioni Meccaniche e durabilità

2- Elementi Strutturali

3- Solette Composte



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: plinti









PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: plinti

Concrete		RC0%	RC30%	RC50%
Cement CEM 525 RI (kg)		350	356	352
Water (kg)		160	186	215
Fine natural aggregates (kg)	0-2 mm	120	130	120
	0-6 mm	600	595	600
Coarse natural aggregates (kg)	4-10 mm	520	365	255
	8-16 mm	600	415	300
Coarse recycled aggregates (kg)	4-16 mm	0	340	560

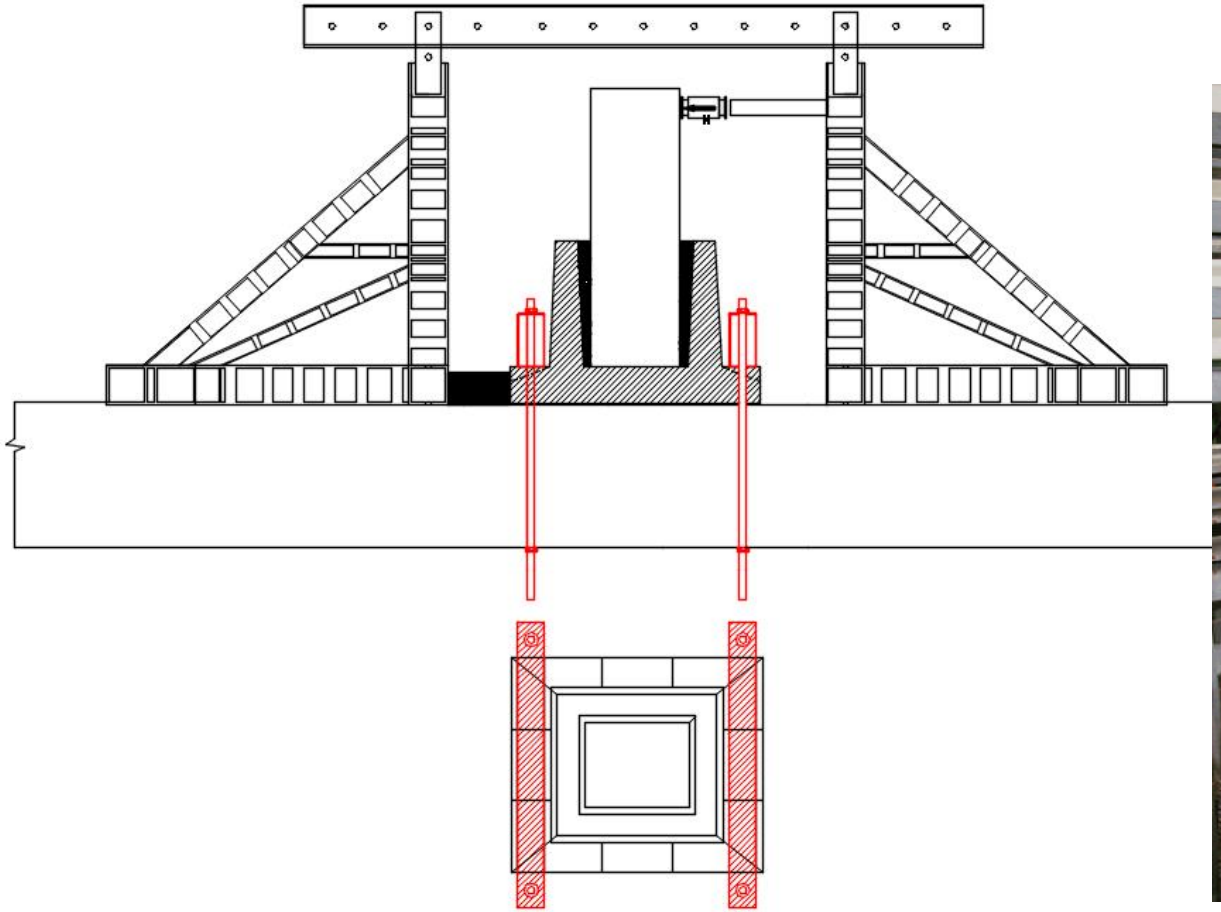
Concrete mix design	$R_{c,28d}$ (MPa)	$R_{c,28d\ average}$ (MPa)	$f_{ct,}$ (MPa)	$f_{ct,average}$ (MPa)	E_c (MPa)
RC0%	37.5 38.2 37.9	37.87	3.55 3.41 3.35	3.44	28640
RC30%	37.1 39.1 38.1	38.10	3.53 3.49 3.43	3.48	28814
RC50%	37.8 33.7 33.4	34.97	3.30 2.96 3.13	3.13	24678



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: plinti





PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: plinti





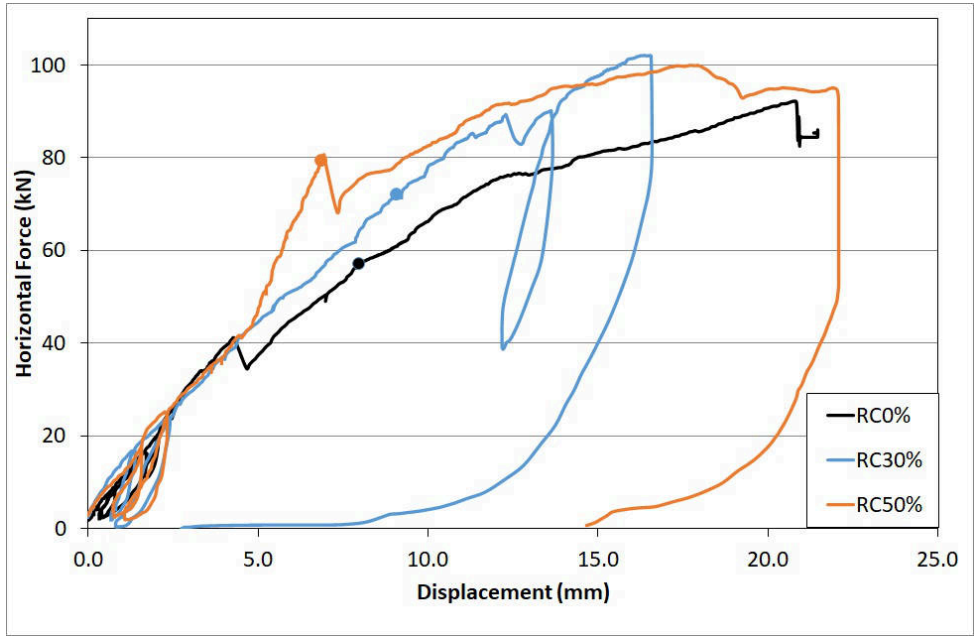


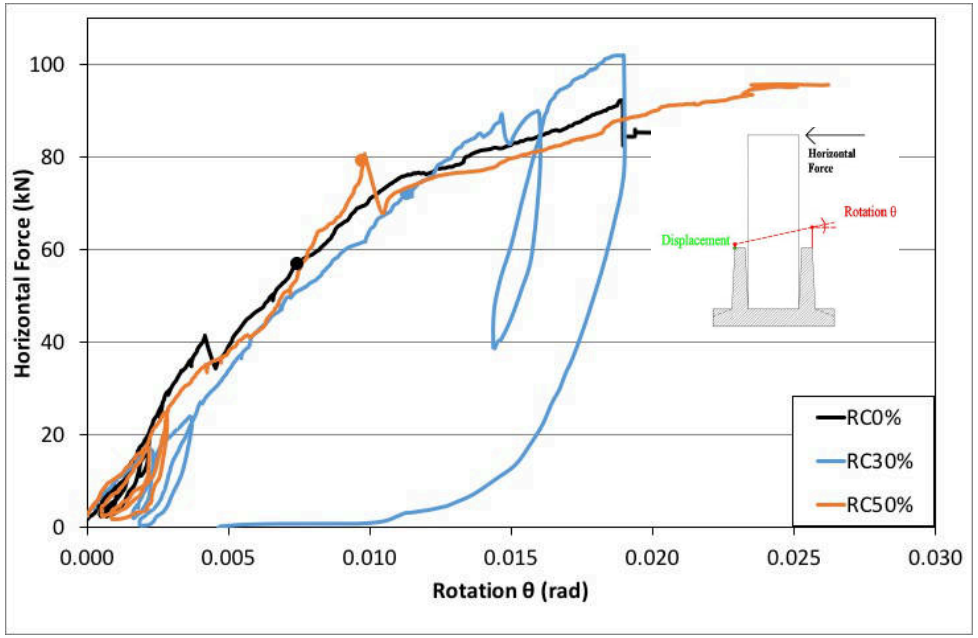


PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: plinti







RC 0%



RC 30%



RC 50%

Campione	Forza di collasso (kN)
Plinto 1 RC0%	98
Plinto 2 RC30%	102
Plinto 3 RC50%	100

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: piastre soggette a punzonamento

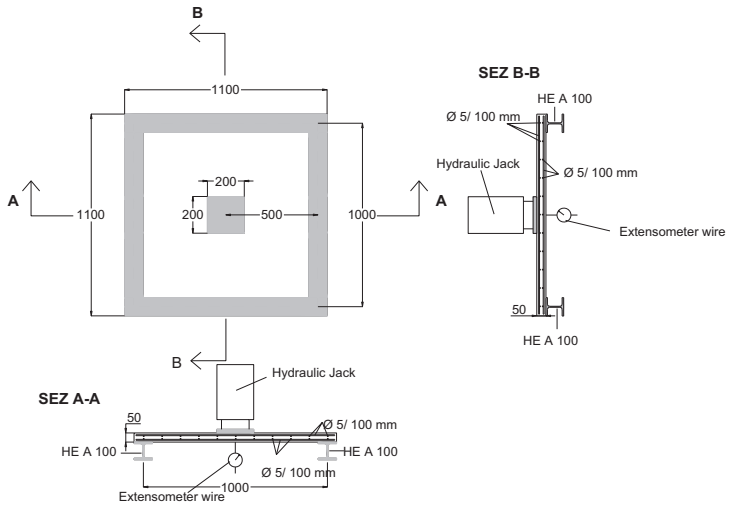
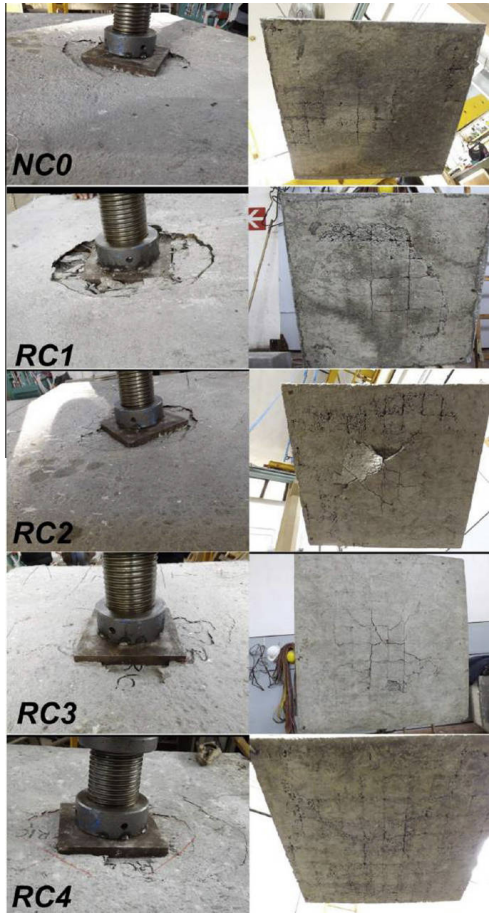
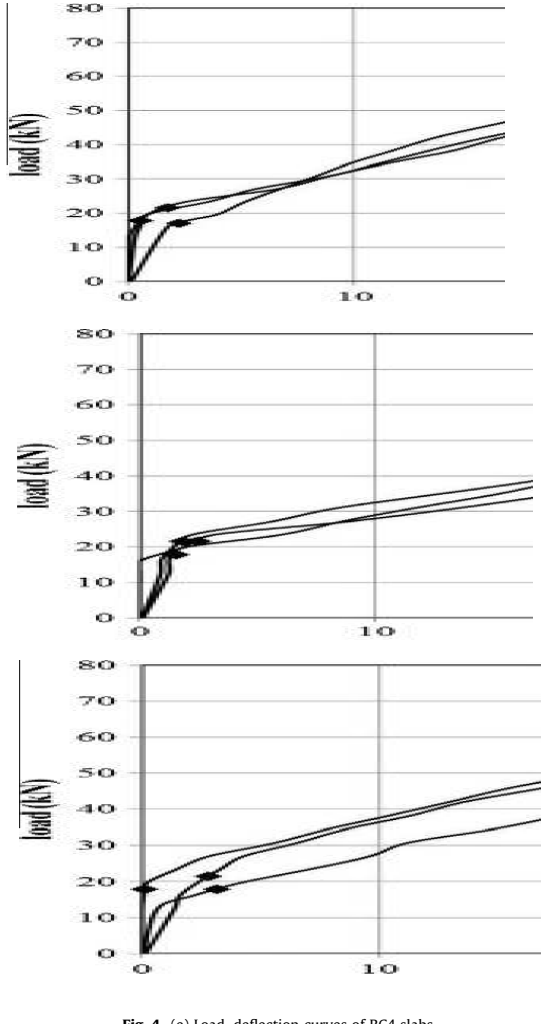


Fig. 1. Geometry of the slab specimen and test setup.

Table 8
Theoretical and experimental punching shear force of tested slabs.

		$V_{Rd,c}$ Model Code 2010 (kN)						
	Level		I		II		III	
	k_{fg}		1.14	2	1.14	2	1.14	2
	d_g (mm)		12	0	12	0	12	0
Samples	V_{exp} (kN)	$V_{exp,\ average}$ (kN)						
NC0-1	72.5							
NC0-2	68.7	68.70	83.00	59.18	90.06	65.60	96.27	71.49
NC0-3	64.9							
RC1-1	64.9							
RC1-2	72.5	69.97	78.50	56.00	85.18	62.05	90.41	66.99
RC1-3	72.5							
RC2-1	64.9							
RC2-2	68.7	66.17	77.50	55.27	84.10	61.26	89.26	66.14
RC2-3	64.9							
RC3-1	68.7							
RC3-2	64.9	68.70	73.85	52.67	80.14	51.38	85.06	63.04
RC3-3	72.5							
RC4-1	68.7							
RC4-2	68.7	69.97	70.15	50.03	76.12	55.45	80.80	59.87
RC4-3	72.5							





Francesconi L., Pani L., Stochino F. "Punching shear strength of reinforced recycled concrete slabs", ***Construction and Building Materials****, 127, 248-263. (2016).*

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

1- Prestazioni Meccaniche e durabilità

2- Elementi Strutturali

3- Solette Composte



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: solette composte

- ✓ Efficienza strutturale
- ✓ Riduzione dei tempi di costruzione
- ✓ Convenienza economica





PRIN 2022 - Steel and Recycled Concrete Slab – SARCOS

www.projectsarcos.it



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

48

Solette composte

2 campagne sperimentali
(2023 e 2024)

6

Miscele di calcestruzzo

Percentuali di sostituzione
degli aggregati riciclati:
0%, 20%, 30%, 50%, 70%, 100%

3

Luci

2.40 m, 2.80 m, 3.20 m

8

LVDTs per soletta

Monitoraggio degli spostamenti
trasversali e longitudinali

SUSTAINABLE MATERIALS
STRONGER STRUCTURES
A BETTER TOMORROW

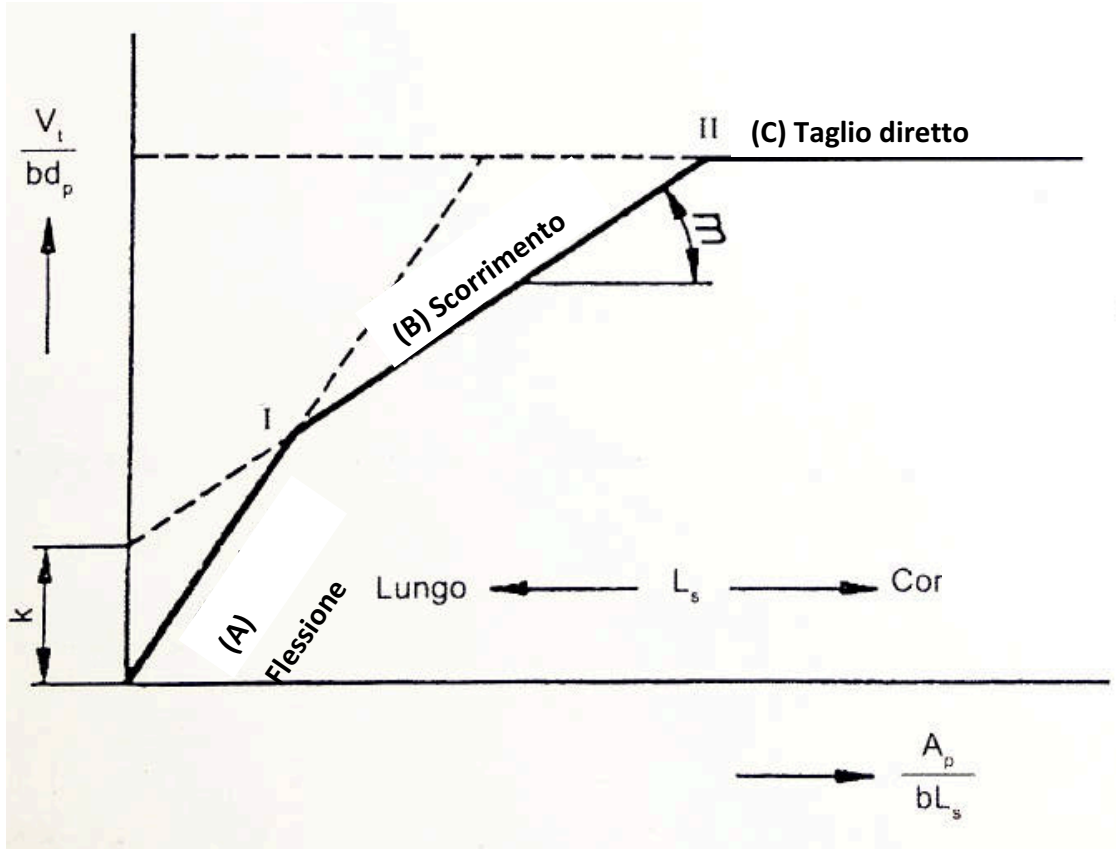


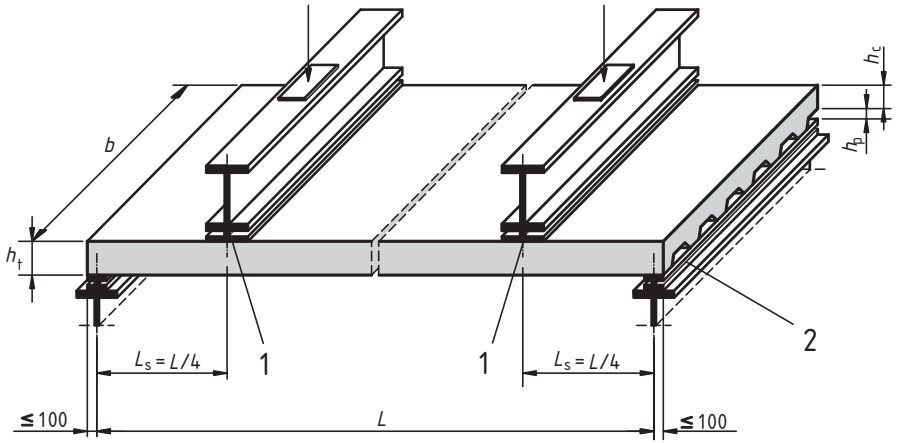
29

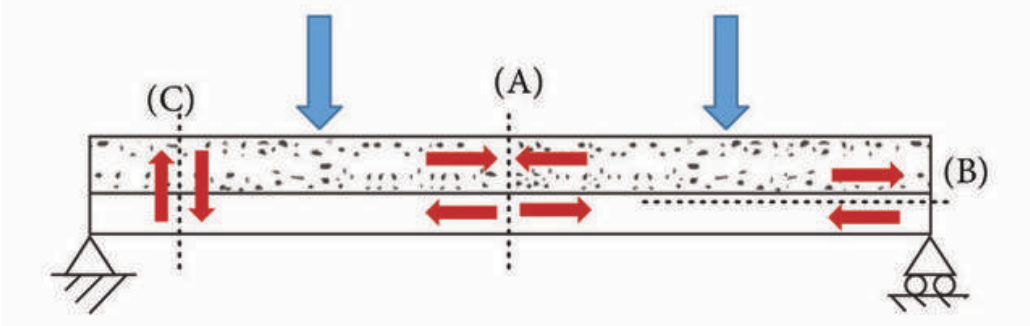
PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

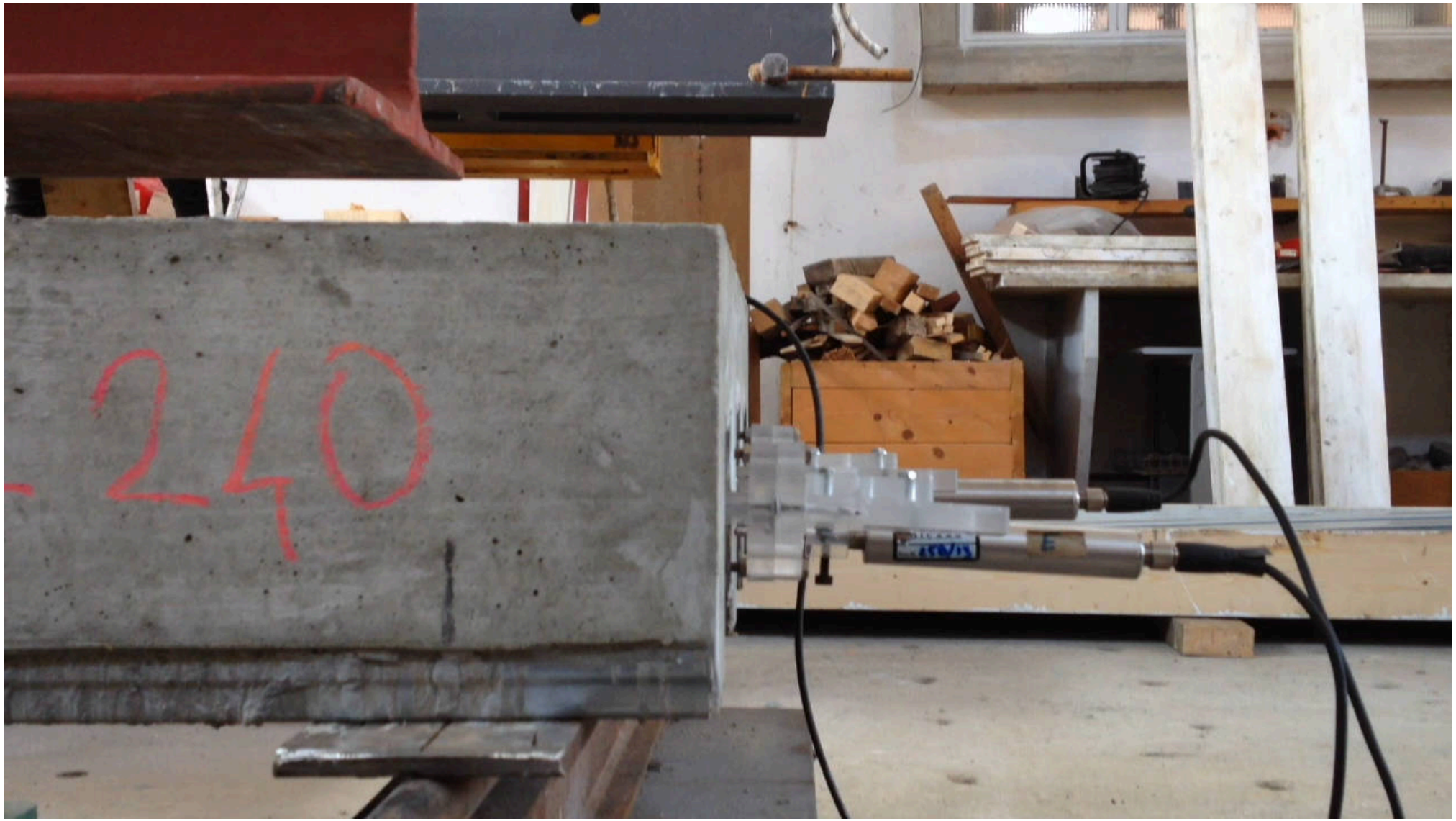
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

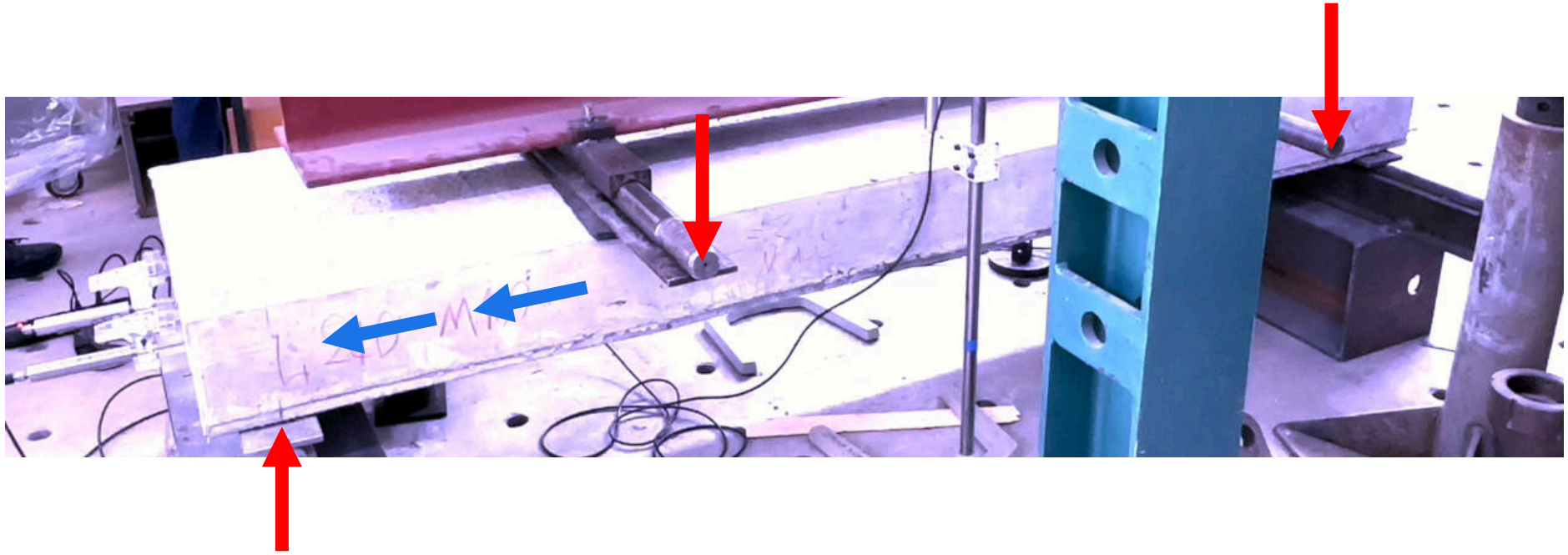
Comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo riciclato: solette composte








240

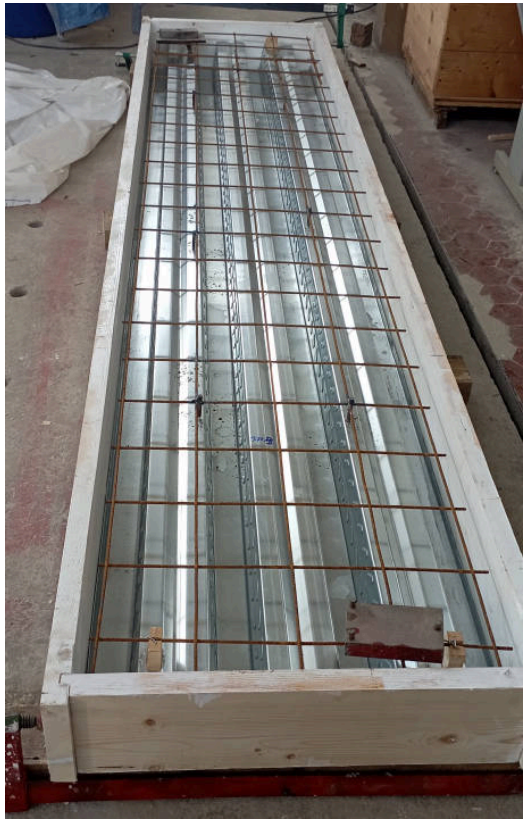


Spinelli

Italcementi
HEIDELBERGCEMENT Group

POLITECNICO
MILANO 1863



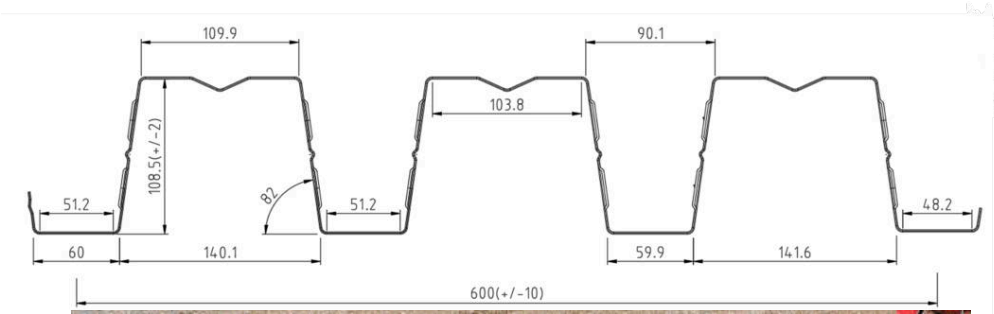






PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura



Cross-section geometry of the Steel Sheets (referred to as SG110-600)





PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Table: Design of Concrete Blends.

Blend	Cement (kg/m^3)	Fine Recycled (%)	Coarse Recycled (%)	Water (kg)	Additive (kg)
M0-0	366	0	0	185	3.30
M30-30	366	30	30	185	3.30
M50-50	366	50	50	185	3.30
M100-100	366	100	100	185	3.30

Programma sperimentale

Luce (cm)	240	280	320	
Mix	M 0-0	M 30-30	M 50-50	M100-100
Rck (Mpa)	43.1	32.3	34.5	23.2



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

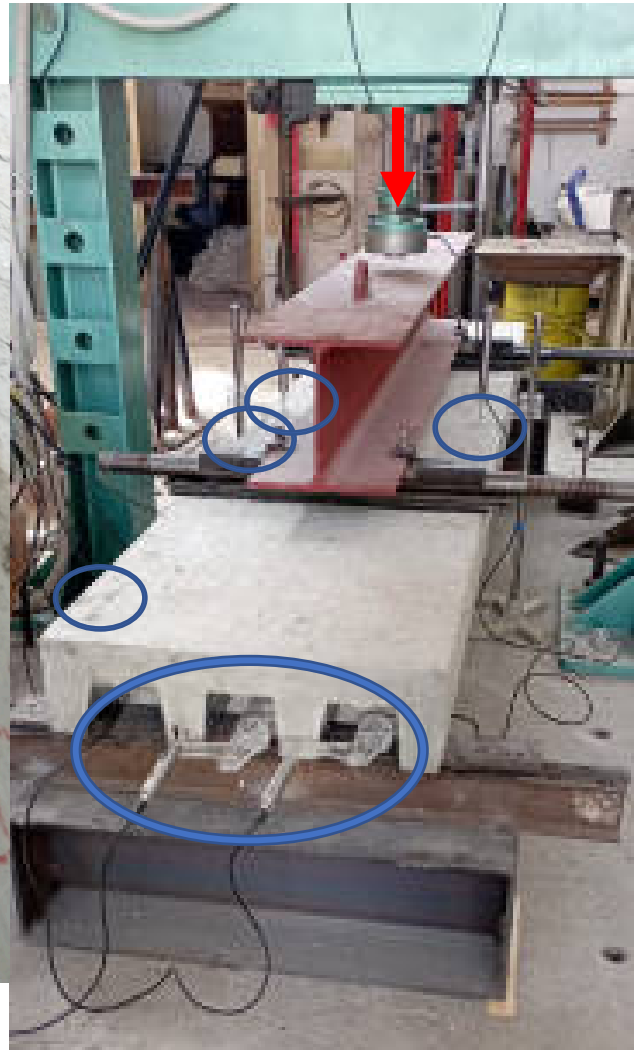




PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura



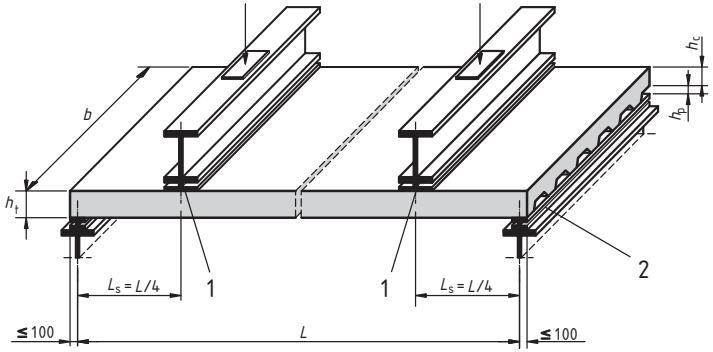




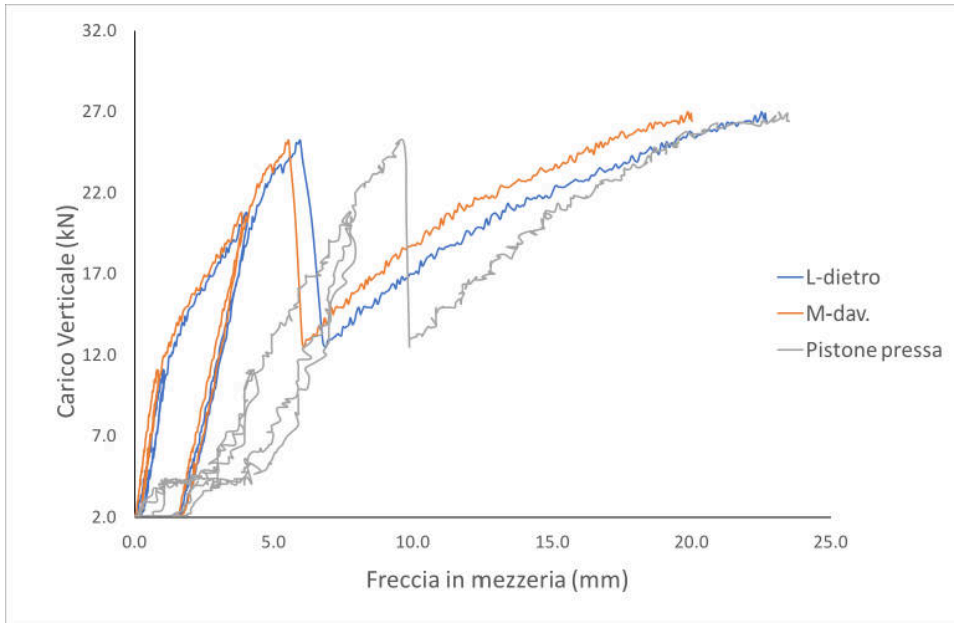
PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

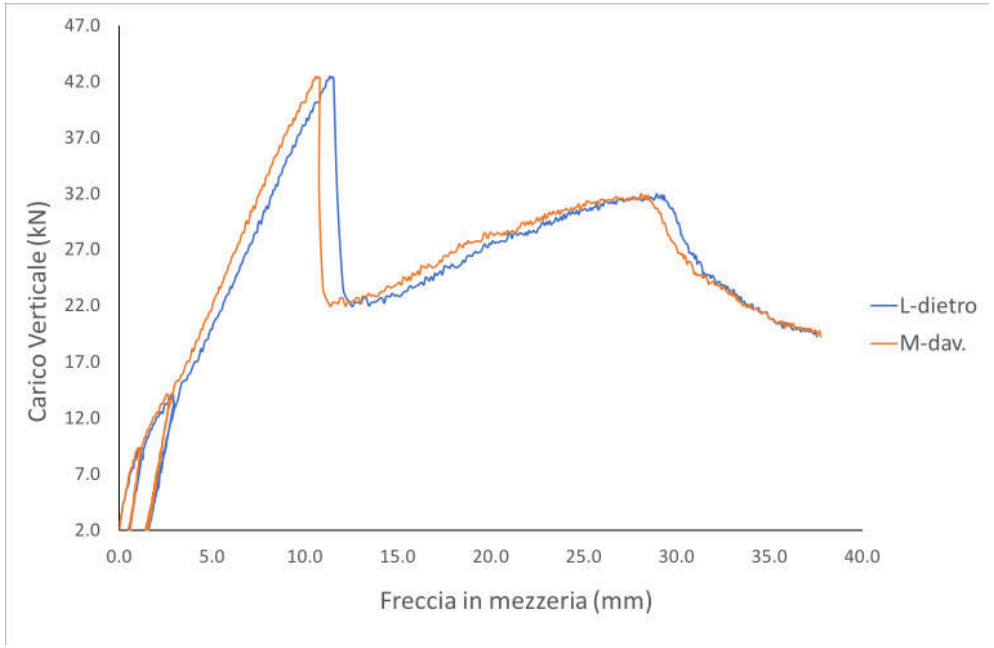
Composite Slab L 320 cm
M0-0 – 27 kN
M50-50 – 42 kN



M 0-0



M 30-30



Comportamento Strutturale Caratterizzato da 3 fasi:



Fase 1

Comportamento Elastico Lineare

Fase 2

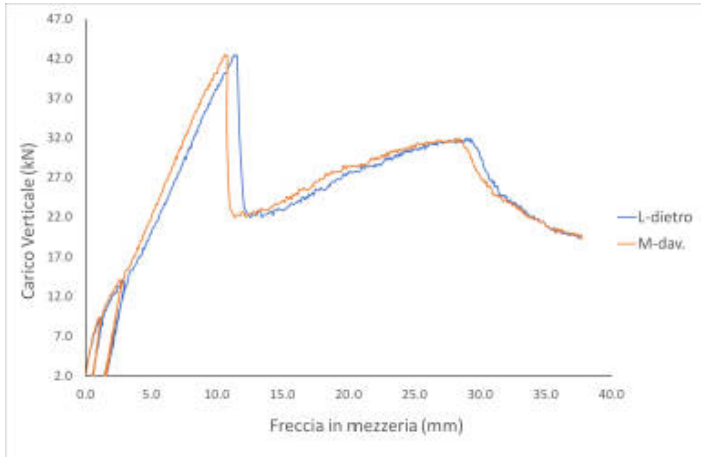
Crollo della capacità a causa dello scorrimento





Fase 3

Meccanisimo resistente residuo flessionale



PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

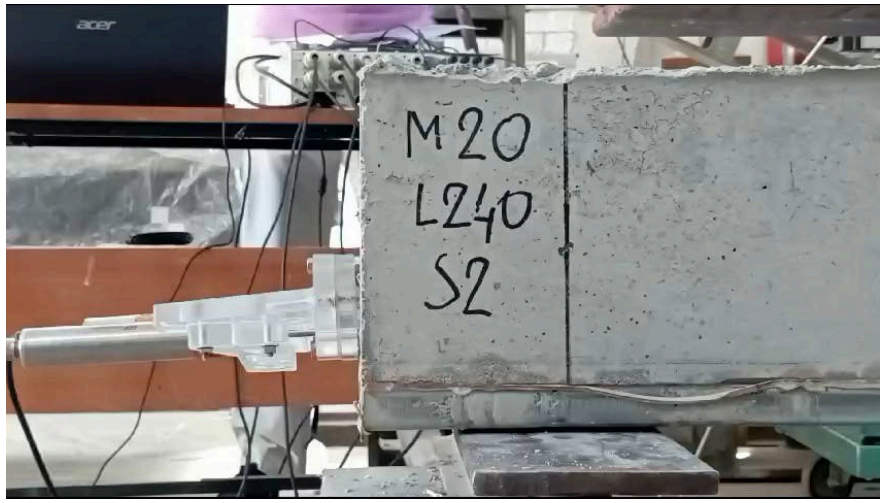
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Comportamento Strutturale Caratterizzato da 3 fasi:

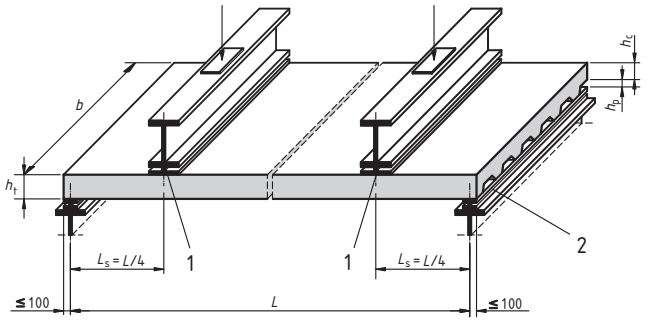




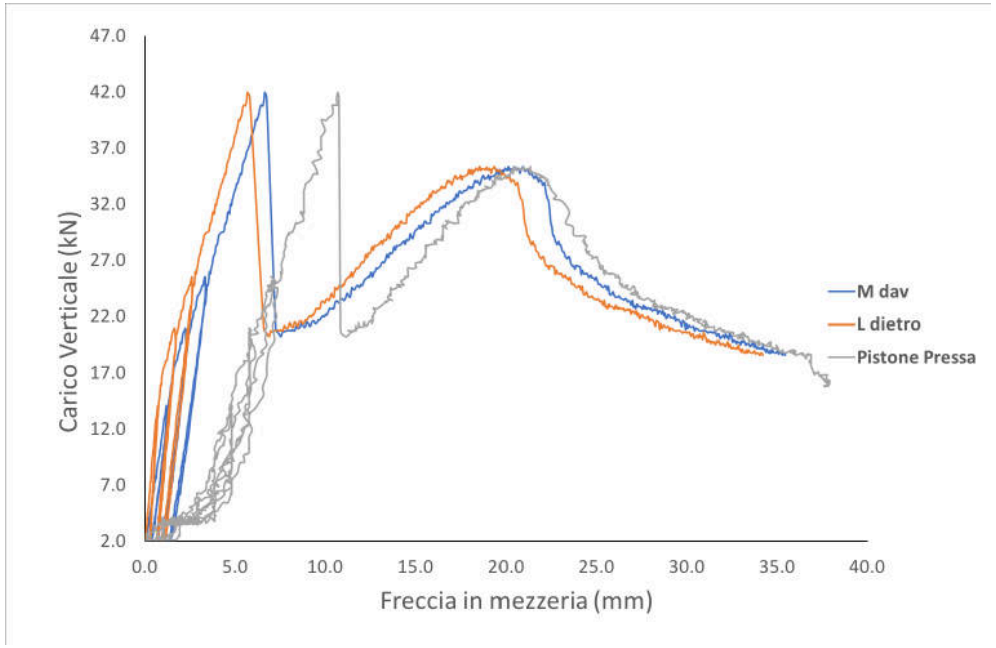




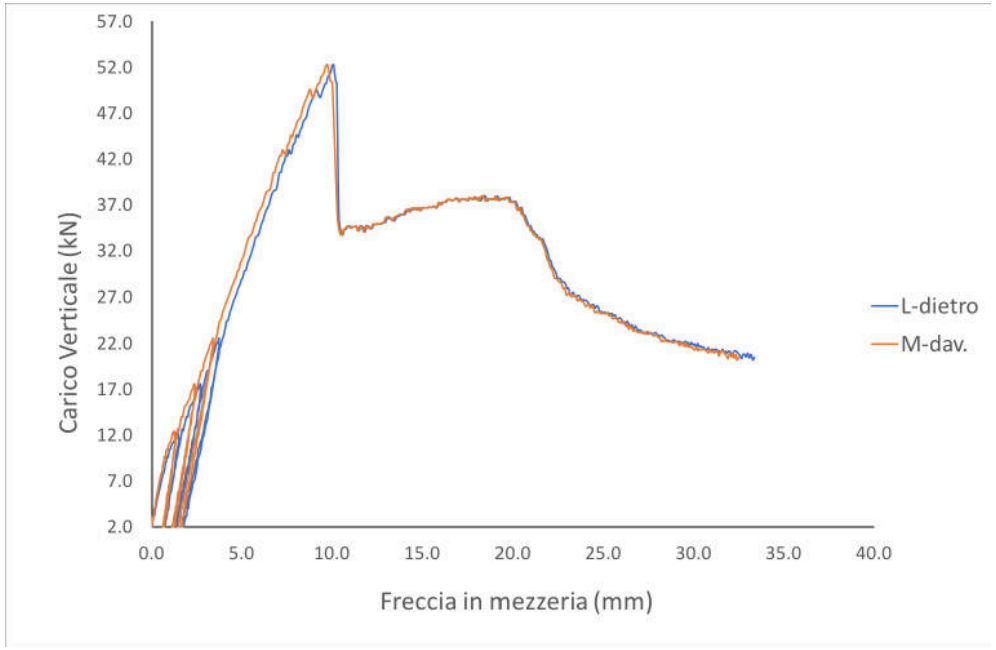
Composite Slab L 280 cm
M0-0 – 41 kN
M50-50 – 52 kN



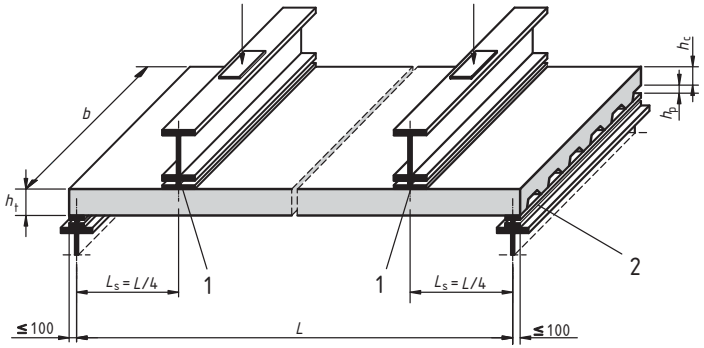
M 0-0



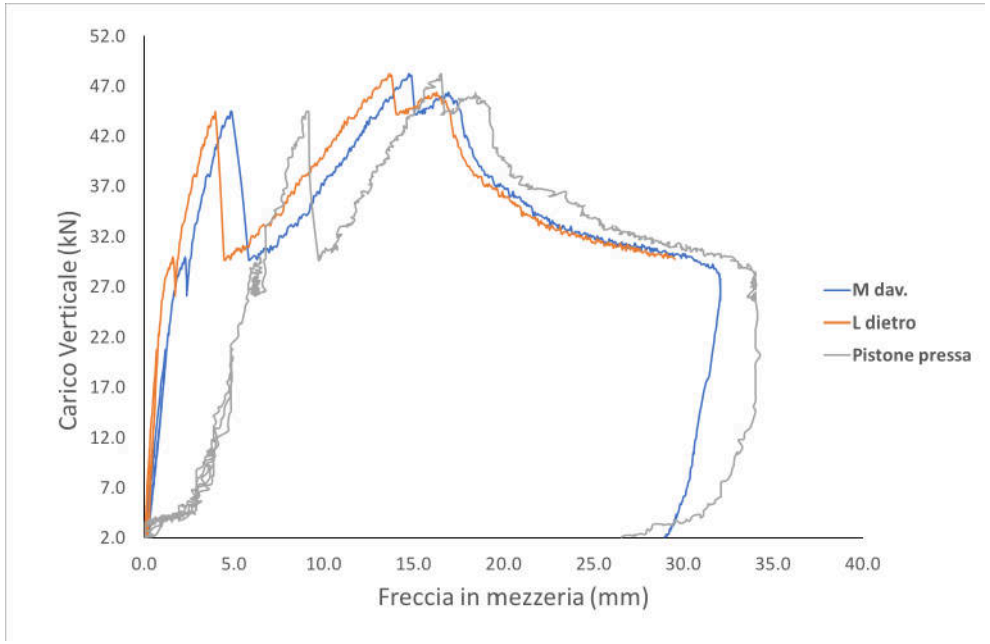
M 50-50



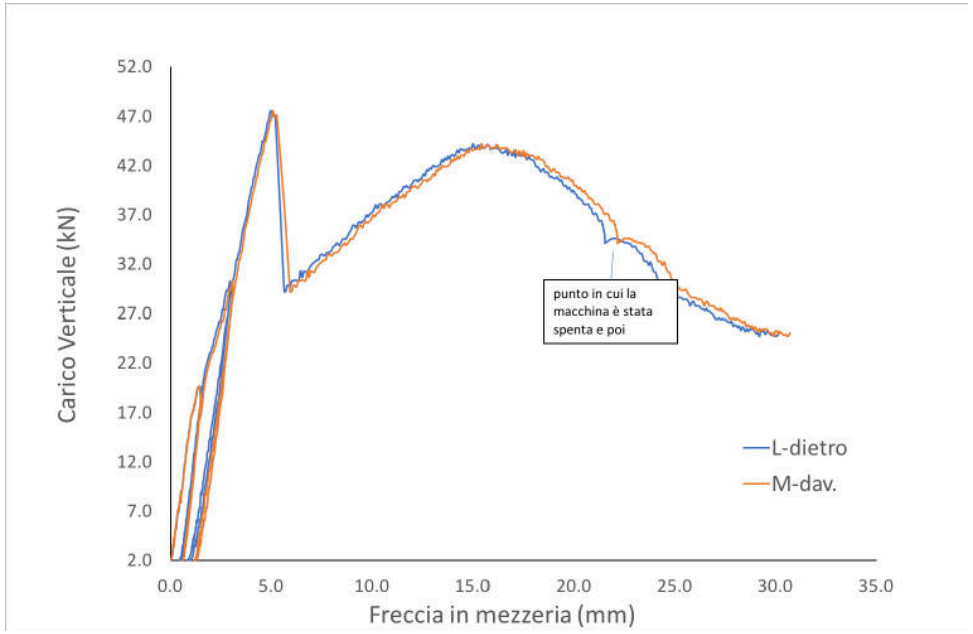
Composite Slab L 240 cm
M0-0 – 44 kN
M50-50 – 47 kN



M 0-0



M 50-50





Carico collasso solette composte (kN)

	L240	L280	L320
M 0-0	44	42	25
M 30-30	55	37	30
M 50-50	47	52	42
M100-100	52	49	47

Resistenza compressione calcestruzzo:

Miscele	M 0-0	M 30-30	M 50-50	M100-100
Rck (Mpa)	43.1	32.3	34.5	23.2

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Table 5
Non-dimensional longitudinal shear strength.

	2400 mm	2800 mm	3200 mm	average	CoV (%)
$\tau_{u,M30}/\tau_{u,M0}$	1.59	0.70	0.64	0.98	0.19
$\tau_{u,M50}/\tau_{u,M0}$	0.95	1.92	1.47	1.44	0.15
$\tau_{u,M100}/\tau_{u,M0}$	1.30	1.57	2.14	1.68	0.13

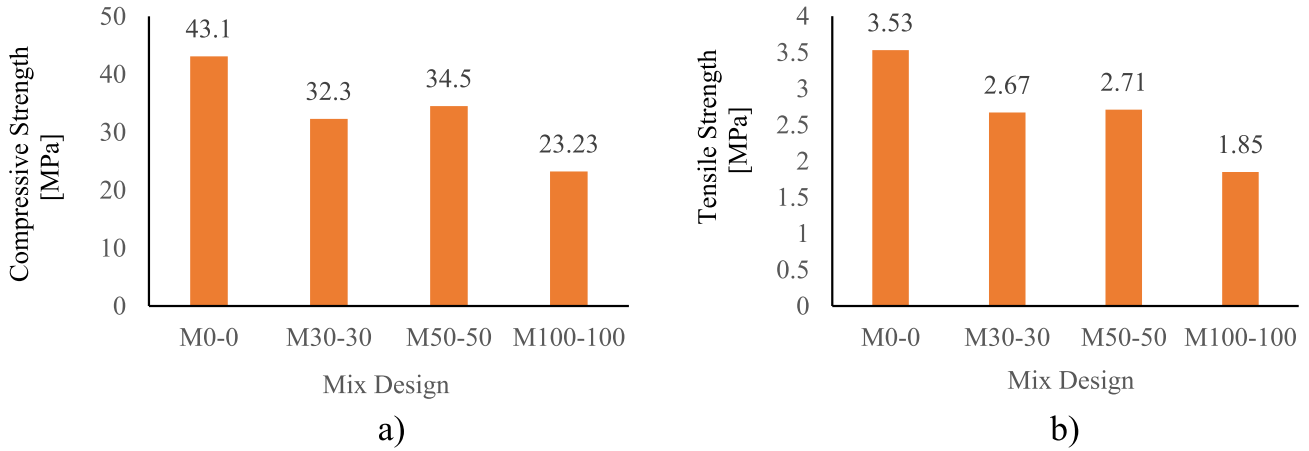


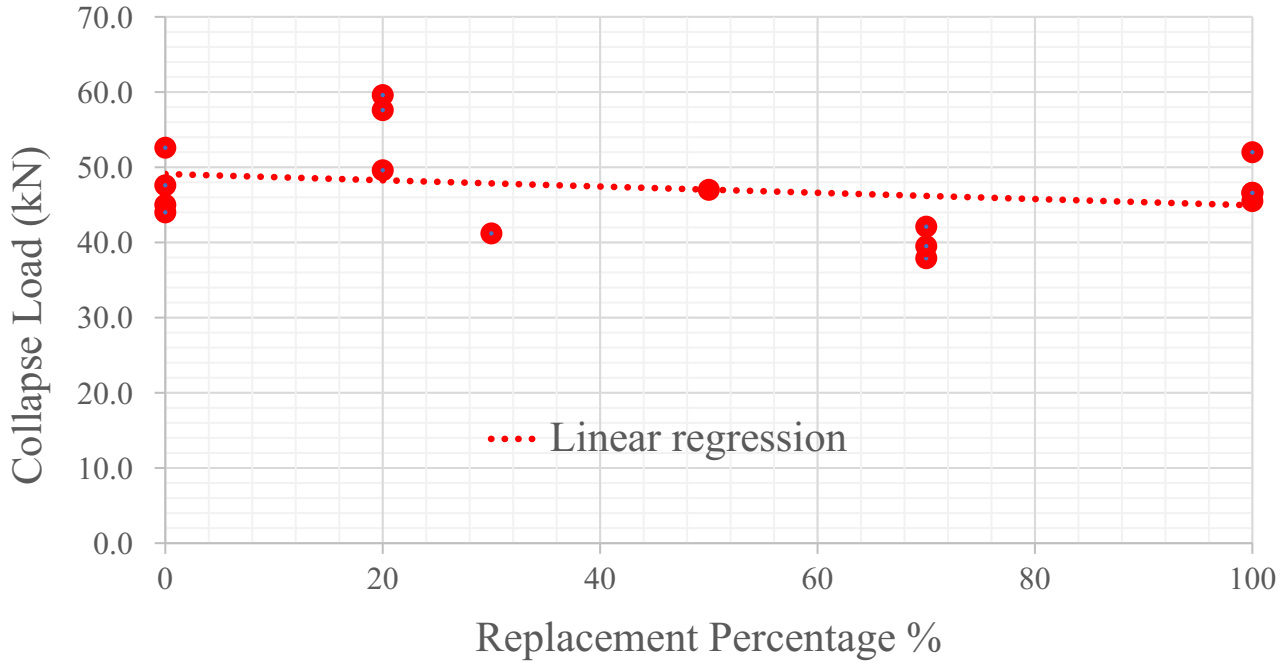
Fig. 4. Effect of recycled concrete aggregates replacement after 28 days of curing: a) compressive and b) tensile strength.



Fig. 10. Typical relative displacements of the steel sheet with respect the concrete during the test.

Stochino, F., Alibeigibeni, A., Zucca, M., Valdes, M., Concu, G., Simoncelli, M., ... & Bernuzzi, C. (2024, December). Mechanical behavior of composite slabs with recycled concrete aggregates: A preliminary study. In *Structures* (Vol. 70, p. 107838). Elsevier.

Risultati complessivi - luce 2.40 m

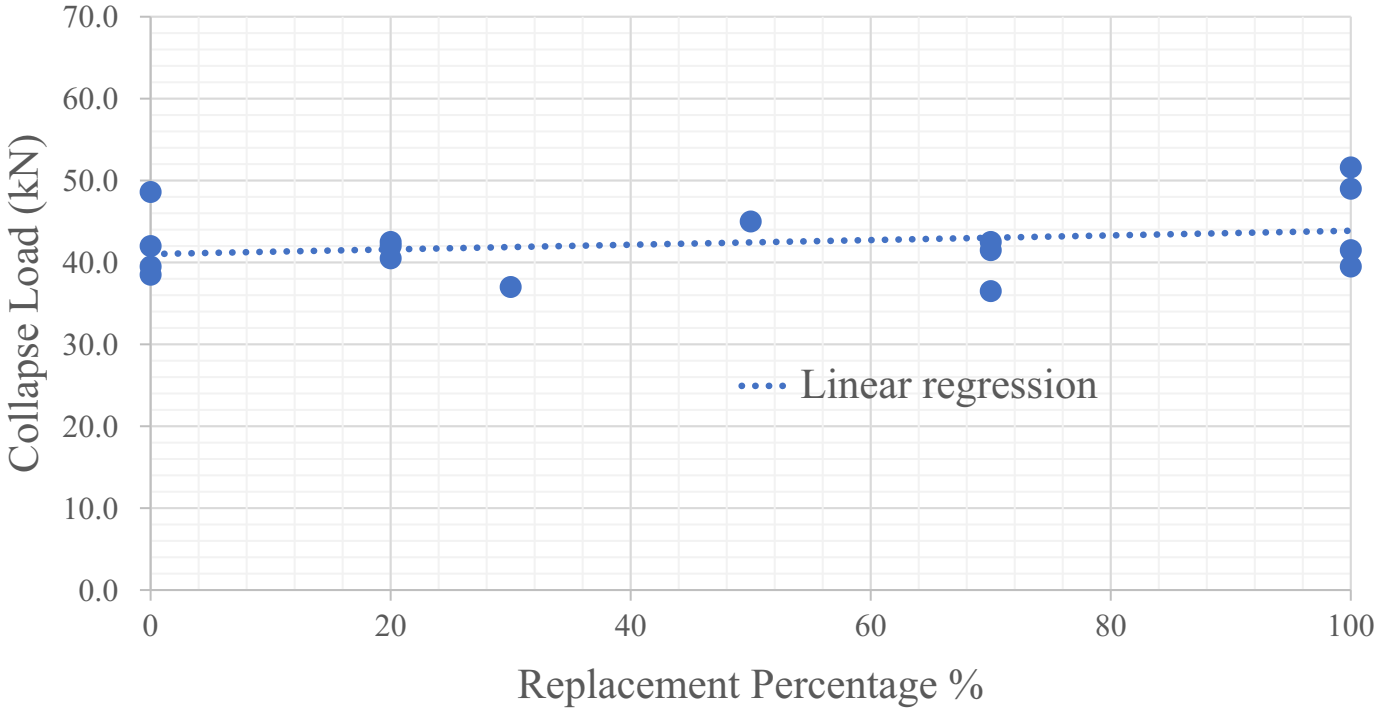




PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

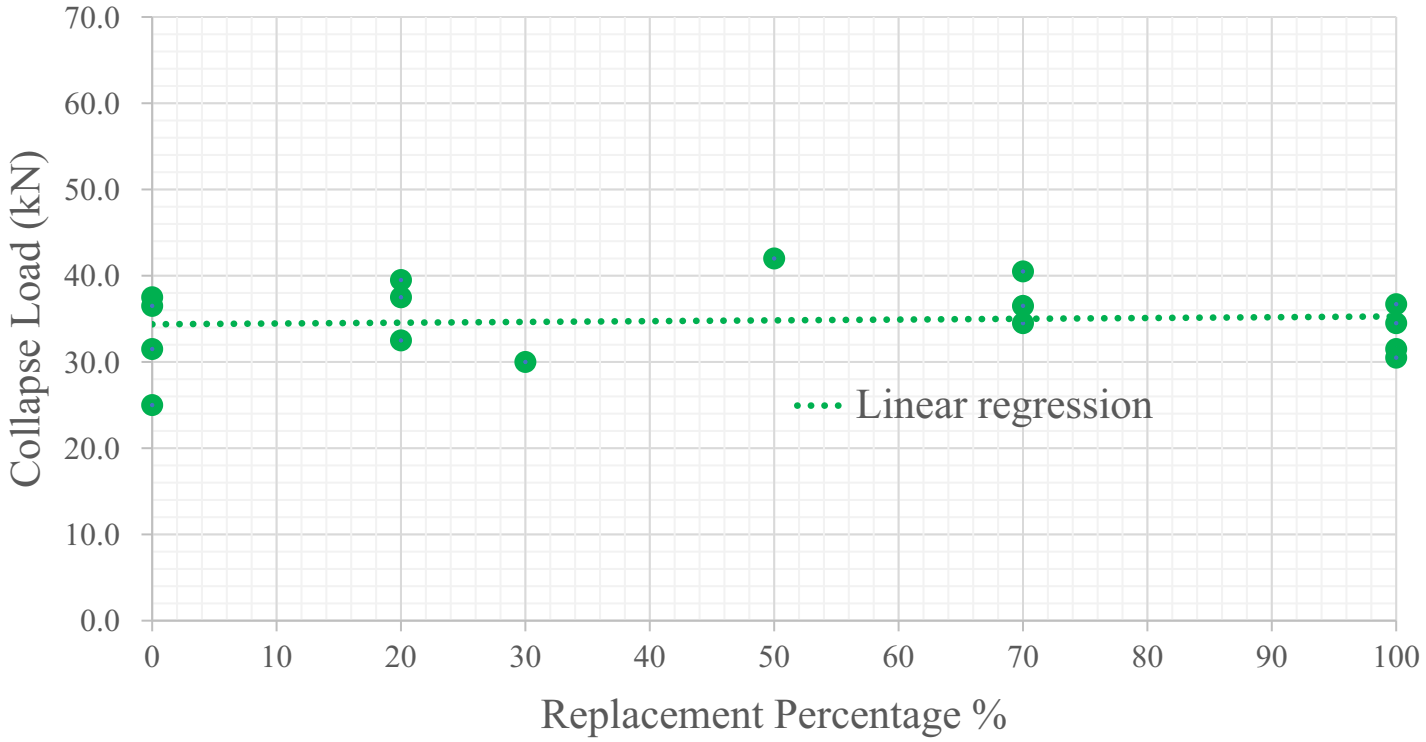
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Risultati complessivi - luce 2.80 m





Risultati complessivi - luce 3.20 m





PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

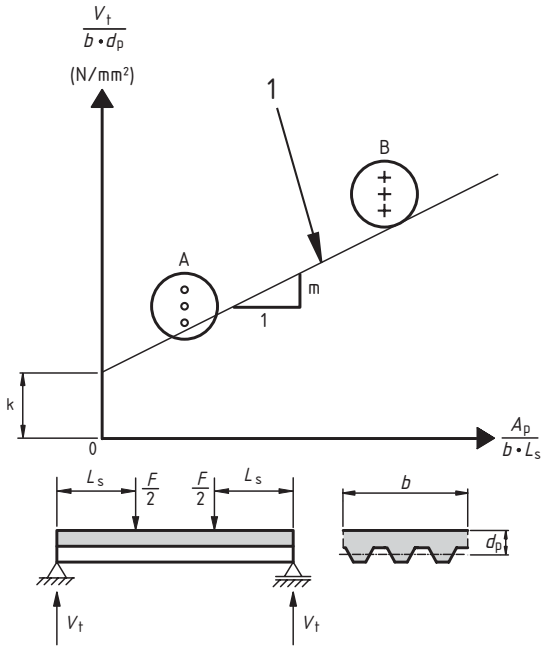
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Modelli normativi per lo scorrimento longitudinale

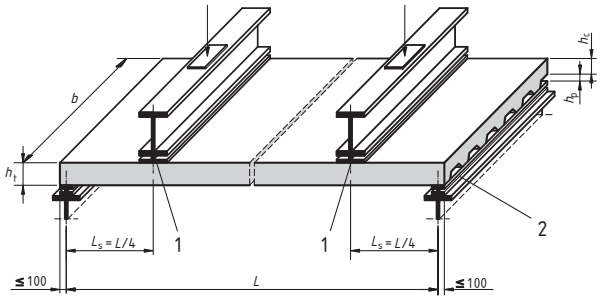
Nel caso di solette composte con connessione mediante ingranamento meccanico o attrito, la verifica a scorrimento longitudinale può essere effettuata utilizzando due metodi (EC4, 9.7.3):

•**Metodo m-k**, una procedura empirica basata essenzialmente sull'analisi statistica dei dati ottenuti da prove sperimentali a flessione eseguite su provini in scala reale.

$$V_{l,Rd} = b \cdot d_p \cdot \frac{\frac{m \cdot A_p}{b \cdot L_s} + k}{\gamma_s}$$



Note: b, d_p and L_s are in mm, A_p is in mm^2, V_t is in N.



Modelli normativi per lo scorrimento longitudinale

Nel caso di solette composte con connessione mediante ingranamento meccanico o attrito, la verifica a scorrimento longitudinale può essere effettuata utilizzando due metodi (EC4, 9.7.3):

•**Metodo m-k**, una procedura empirica basata essenzialmente sull'analisi statistica dei dati ottenuti da prove sperimentali a flessione eseguite su provini in scala reale.

$$\boldsymbol{V_{l,Rd}} = b \cdot d_p \cdot \frac{\frac{m \cdot A_p}{b \cdot L_s} + k}{\gamma_s}$$

•**Metodo dell'interazione parziale**, una procedura semi-empirica basata su un modello meccanico calibrato mediante i risultati delle prove sperimentali.

$$\boldsymbol{M_{Rd}} = M_{pr} + \eta \cdot N_{cf} \cdot z \qquad \eta = \frac{N_c}{N_{cf}} \qquad N_c = \tau_u \cdot b\left(L_0 + L_s\right)$$

$$M_{pr} = 1.25 \cdot M_{pa} \cdot \left(1 - \frac{\eta N_{cf}}{A_p \cdot f_{pd}}\right) \leq M_{pa}$$

$$z = h_t - 0.5h_c - e_p + \left(e_p - e\right) \cdot \frac{\eta N_{cf}}{A_p f_{pd}}$$

PROSPECTA FORMAZIONE Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB network per l'edilizia e l'architettura

Metodologia di progetto – metodo m-k

$$\frac{V_{l,Rd}}{b\ d_p} = m\frac{A_p}{b\ L_s} + k$$

Gli studi in letteratura hanno mostrato che la resistenza all'interfaccia evolve attraverso 3 fasi successive:

ADESIONE CHIMICA

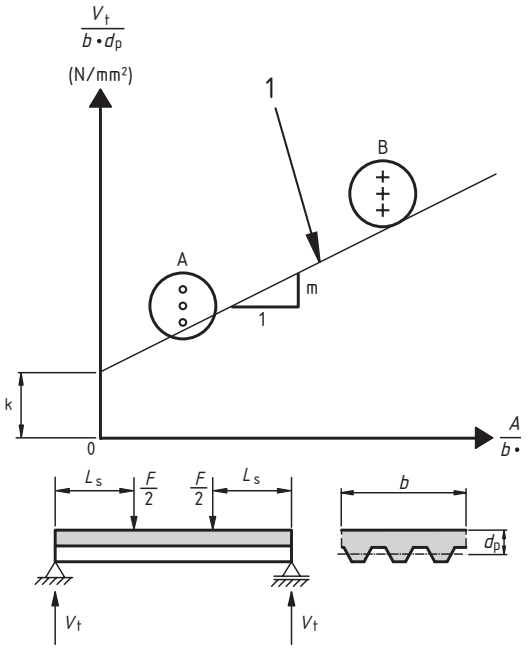
Un legame molto fragile che si sviluppa durante le fasi di presa e indurimento del calcestruzzo. L'EC4 richiede cicli iniziali di pre-carico per eliminare questo legame, poiché esso non rappresenta una forma stabile di collaborazione strutturale.

INGRANAMENTO MECCANICO

La **pendenza m** rappresenta il contributo dell'ingranamento meccanico. Essa aumenta con l'efficacia della geometria delle bugnature e, quindi, con la capacità del calcestruzzo di ancorarsi alla lamiera di acciaio.

ATTRITO

L'intercetta k rappresenta la resistenza per attrito che agisce lungo la superficie di contatto residua, influenzata da fattori quali la rugosità superficiale e la pressione normale applicata.



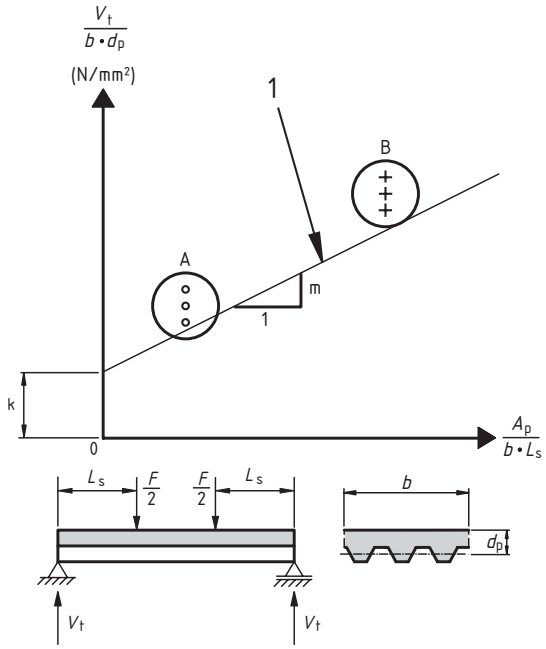
Note: b, d_p and L_s are in mm, A_p is in mm^2, V_t is in N.

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Metodologia di progetto – metodo m-k

Mix design	MECHANICAL INTERLOCK *m*-parameter (kN/mm^2)	FRICTION *k*-parameter (kN/mm^2)
M0	74,5882	0,0990
M20	87,0775	0,0831
M30	104,8139	0,0141
M50	47,6940	0,1717
M70	16,4571	0,2100
M100	7,0036	0,2550

$$\frac{V_{l,Rd}}{b\ d_p} = m\frac{A_p}{b\ L_s} + k$$

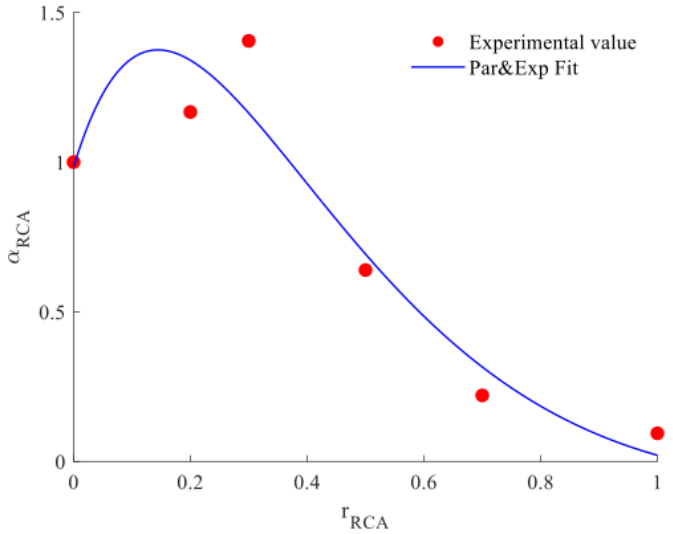


Note: b, d_p and L_s are in mm, A_p is in mm^2, V_t is in N.

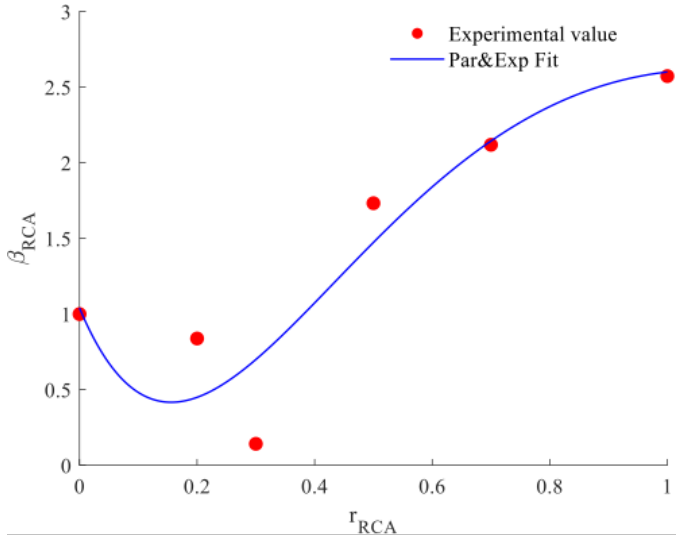
PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Metodologia di progetto – metodo m-k - modificato

$$\frac{V_{mod}}{b\ d_p} = \alpha_{RCA} m_0 \frac{A_p}{b\ L_s} + \beta_{RCA} k_0$$



$$a_{RCA}(x) = \left(-10.0097x^2 + 9.4706x + 0.9833\right) exp^{-3.0703x}$$



$$\beta_{RCA}(x) = \left(26.7378x^2 - 7.1443x + 1.0403\right) exp^{-2.0702x}$$

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

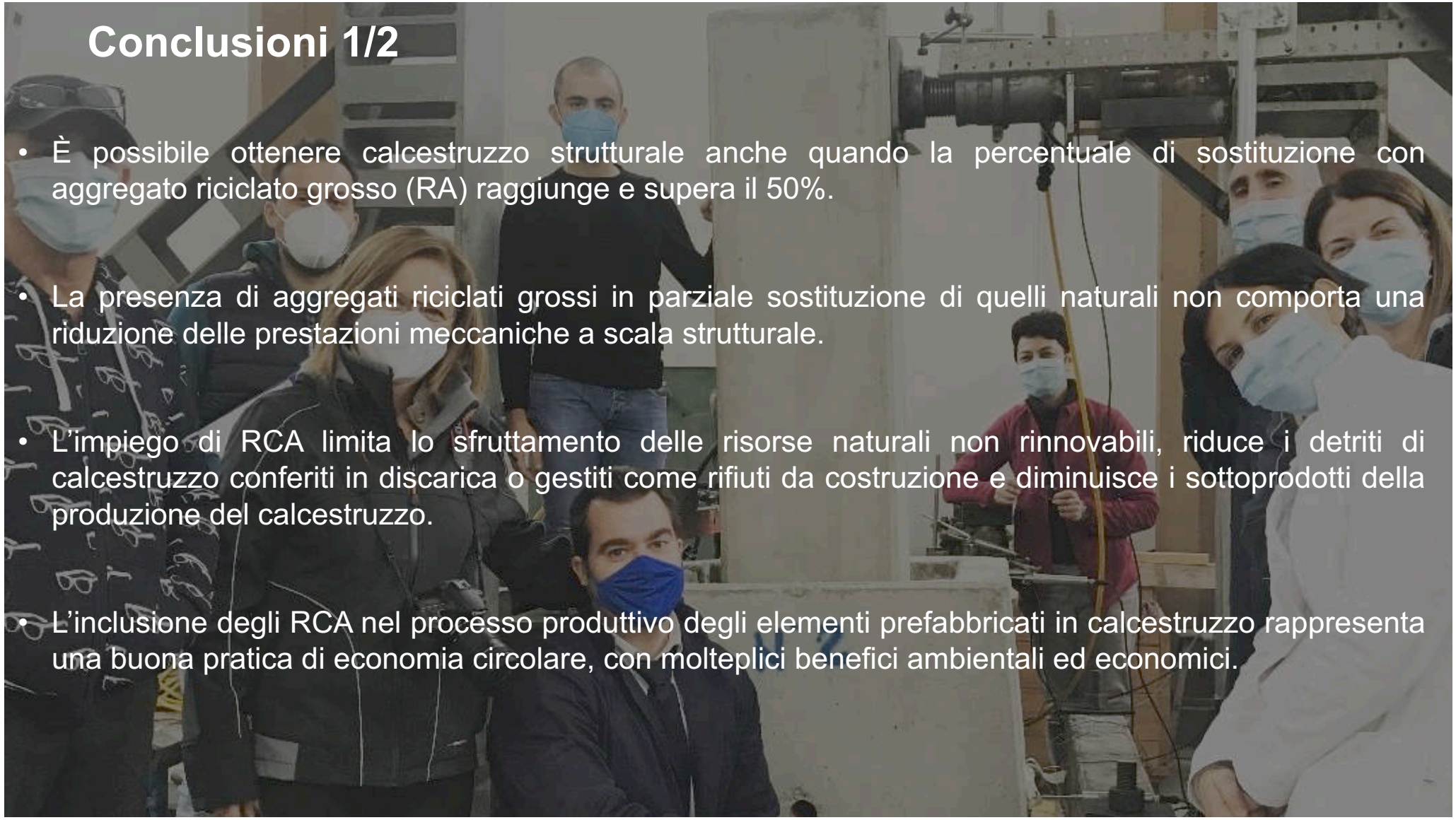
Perché le solette composte con RCA presentano una buona capacità resistente allo scorrimento longitudinale:

1. **Maggiore rugosità superficiale:** gli aggregati RCA sono generalmente più angolari e rugosi rispetto agli aggregati naturali, creando una superficie più irregolare e favorendo l'aderenza con l'acciaio. La maggiore rugosità superficiale migliora l'ingranamento meccanico tra acciaio e matrice cementizia.

2. Maggiore porosità del calcestruzzo: gli RCA presentano spesso pori e vuoti non presenti negli aggregati naturali. Questi pori possono favorire la formazione di uno strato di aderenza più efficace tra acciaio e matrice cementizia. Ne consegue un incremento della resistenza di aderenza grazie alla maggiore area di contatto interfacciale.

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri
INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura

Conclusioni 1/2



- È possibile ottenere calcestruzzo strutturale anche quando la percentuale di sostituzione con aggregato riciclato grosso (RA) raggiunge e supera il 50%.
- La presenza di aggregati riciclati grossi in parziale sostituzione di quelli naturali non comporta una riduzione delle prestazioni meccaniche a scala strutturale.
- L'impiego di RCA limita lo sfruttamento delle risorse naturali non rinnovabili, riduce i detriti di calcestruzzo conferiti in discarica o gestiti come rifiuti da costruzione e diminuisce i sottoprodotti della produzione del calcestruzzo.
- L'inclusione degli RCA nel processo produttivo degli elementi prefabbricati in calcestruzzo rappresenta una buona pratica di economia circolare, con molteplici benefici ambientali ed economici.

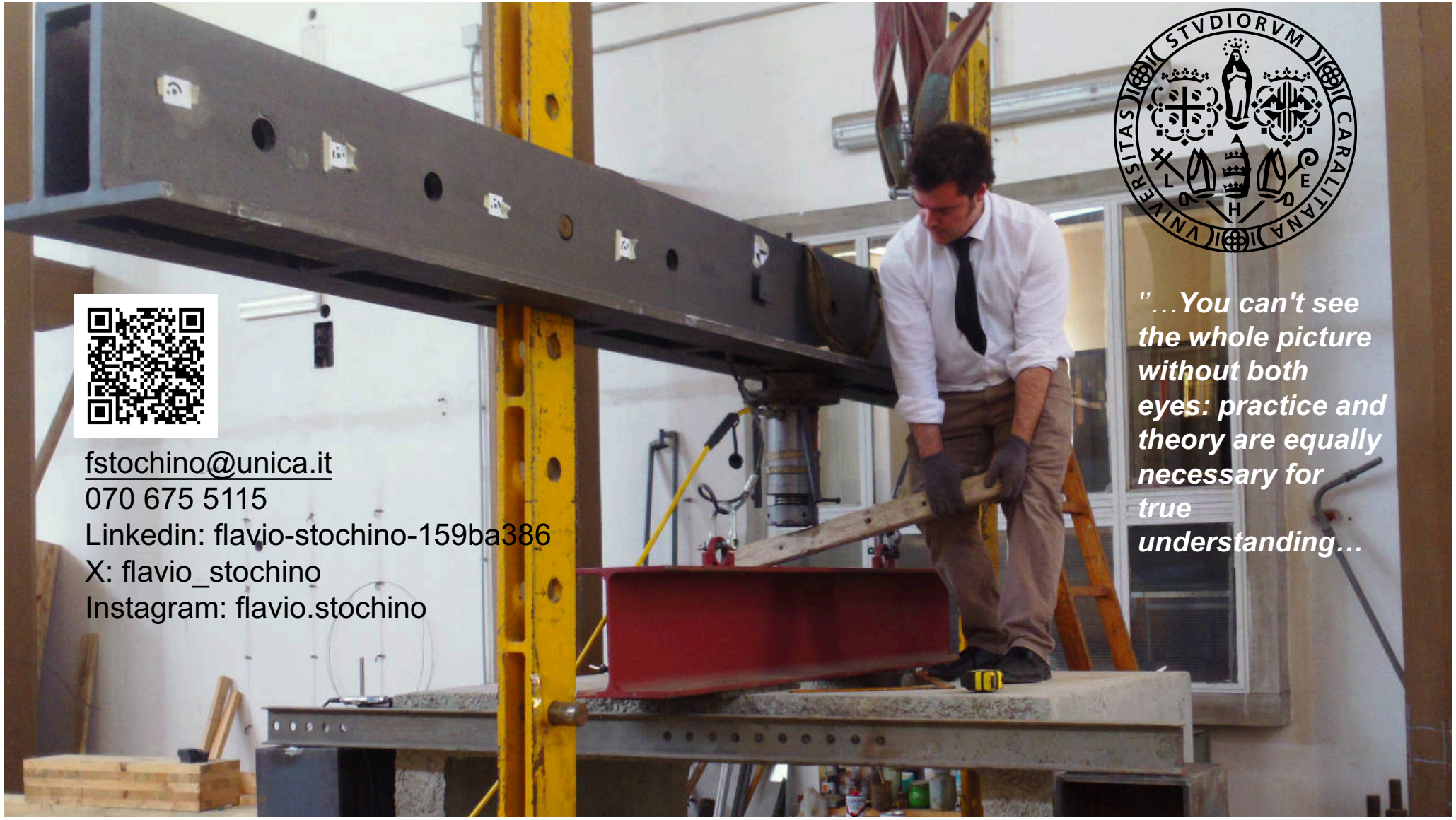
Conclusioni 2/2



- Risorsa economica per i prefabbricatori
- Life Cycle Thinking – Progetto dell'intero ciclo di vita

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura



fstochino@unica.it
070 675 5115
Linkedin: flavio-stochino-159ba386
X: flavio_stochino
Instagram: flavio.stochino

"…You can't see the whole picture without both eyes: practice and theory are equally necessary for true understanding…

PROSPECTA FORMAZIONE
Alta formazione Architetti Ingegneri Geometri

INFOWEB
network per l'edilizia e l'architettura